

การคำนวณระนาบการหีบจับแบบสามนิ้วในสามมิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATION OF 3D THREE-FINGER GRASPING PLANE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การคำนวณระนาบการหีบจับแบบสามนิ้วในสามมิติ
โดย	นายกীরติ พูนวัฒน์ชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณวิทย์ สุตแสง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

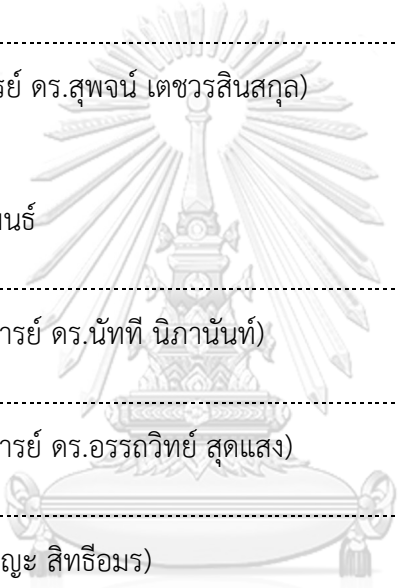
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทินี นิภานันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณวิทย์ สุตแสง)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิชญะ สิทธิอมร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ธนธร พ่อคำ)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

กิริติ พูนวัฒนชัย : การคำนวณระนาบการหยิบจับแบบสามนิ้วในสามมิติ. (COMPUTATION OF 3D THREE-FINGER GRASPING PLANE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ.ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง

ความสามารถในการหยิบจับสิ่งของเป็นความฝืนอันยาวนานของหุ่นยนต์ ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามในการวิจัยอย่างจริงจังในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา หุ่นยนต์ที่ทันสมัยที่สุดก็ยังคงหยิบจับสิ่งของไม่ได้ ความท้าทายหลักคือการจัดการกับข้อผิดพลาดและความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น การวางแผนการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ในวิธีการแบบดั้งเดิมเช่น ICR และ caging สามารถจัดการกับปัญหาความไม่แน่นอนในระดับหนึ่งแต่ยังให้ผลลัพธ์ไม่ดีเท่าที่ควร วิทยานิพนธ์นี้จึงพยายามมองการหยิบจับวัตถุในมุมมองที่กว้างมากขึ้นโดยมุ่งเป้าไปที่การหาระนาบของการหยิบจับที่ดี (แทนที่การระบุจุดจับ) เพื่อวางนิ้วหุ่นยนต์ทั้งสาม วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการเพื่อหาระนาบการหยิบจับสำหรับมือหุ่นยนต์แบบสามนิ้ว โดยข้อมูลนำเข้าคือโมเดลสามมิติของวัตถุ และในการวัดผลได้มีการทดลองบนหุ่นยนต์จริงเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5870118021 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD: Robot Grasping, three-Finger Grasping, Grasp Planning, Grasp Approach Direction, Grasping Plane

Kirati Poonwattanachai : COMPUTATION OF 3D THREE-FINGER GRASPING PLANE. Advisor: Asst. Prof. Attawith Sudsang, Ph.D.

Empowering a robot with ability to grasp has been a long dream in robotics. Despite serious research effort over many decades, even the most advanced robots still struggle in the area of grasping. The main challenge is how to deal with errors and uncertainty. In grasp planning, traditional methods such as ICR and caging deal with the uncertainty problem at the contact level and suffer the poor performances. This thesis explores a more global outlook by aiming at finding a promising grasping plane (instead of individual points) to place the three contact points. The thesis presents a heuristic method to find a plane through the object to place the three finger contact. The input of the method is the input mesh model of the object. Physical experiment is also presented to show the effectiveness of the method.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Computer Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและส่งเสริมเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาทั้งในส่วนขอ แนวทางในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ รวมถึงข้อแนะนำต่างๆ ของงานวิจัยและเรื่องอื่นๆ นอกเหนือจาก งานวิจัย ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์ ตลอดจนกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พิชฎะ สิทธิอมร และ ดร.ธนะธร พ่อคำ ที่ได้กรุณาสละ เวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

และที่ขาดมิได้คือ ขอขอบคุณเหล่าสมาชิกของห้องปฏิบัติการวิจัยระบบอัจฉริยะ ISL2 ทุกคน ที่ช่วยให้คำแนะนำต่างๆ ทั้งในเรื่องของงานวิจัยและเรื่องอื่นๆ รวมไปถึงแนวทางในการแก้ปัญหาและ อุปสรรคต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดามารดาผู้ให้กำเนิด รวมไปถึงญาติพี่น้องทุกคนที่ให้อภัยและ สนับสนุนผู้วิจัยตลอดมา และขอขอบคุณอีกหลายท่านที่ไม่สามารถเอ่ยนามได้ทั้งหมด ณ ที่นี้ด้วยใจจริง

กীরติ พูนวัฒนชัย

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3. การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1. กรวยของแรงเสียดทาน (Friction Cone).....	6
2.2. แบบจำลองนิ้วสำหรับหุ่นยนต์ (Finger Model).....	7
2.3. เวนช์ (Wrench).....	7
2.4. คุณสมบัติปิดของแรง (Force Closure).....	8
2.5. คุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ่นยนต์สามนิ้ว (Three-Finger Force Closure).....	9
บทที่ 3 ระนาบการหยิบจับแบบสามนิ้ว (Three-Finger Grasping Plane).....	10
3.1. แนวคิดของระนาบการหยิบจับ.....	10
3.2. วิธีการหาระนาบการหยิบจับแบบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวล	12

3.3. วิธีการหาคะแนนการหยิบจับแบบคิดระยะ	14
บทที่ 4 การทดสอบการทำงาน.....	16
4.1. ข้อมูล เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้	16
4.1.1. KIT Object Database	16
4.1.2. Kinect2 for Xbox one	17
4.1.3. แขนหุ่นยนต์ (Katana Robotic Arm).....	18
4.1.4. มือจับแบบสามนิ้ว (Three-Finger Gripper).....	20
4.1.5. เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer)	22
4.2. การทดลอง.....	22
4.2.1. การทดลองจากข้อมูลนำเข้าจาก Kit object database	23
4.2.2. การทดลองจากข้อมูลนำเข้าที่สแกนด้วย Kinect V2	30
4.3. การทดลองบนหุ่นยนต์จริง	33
4.3.1. วัตถุที่ใช้ทดสอบ.....	33
4.3.2. สภาพแวดล้อมในการทดลอง.....	34
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและแนวทางการวิจัยในขั้นต่อไป	40
5.1. สรุปงานวิจัย.....	40
5.2. แนวทางวิจัยในขั้นต่อไป.....	41
บรรณานุกรม.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	46

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางคุณสมบัติของหุ่นยนต์ Katana รุ่น 6M180.....	19
ตารางที่ 2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองหีบวัตถุของหุ่นยนต์	35
ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการทดลองบนหุ่นยนต์จริง	36



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แรงที่นิ้วกระทำต่อวัตถุภายในกรวยแรงเสียดทาน	6
รูปที่ 2 รูปแบบจำลองนิ้ว (a) นิ้วแข็งไร้แรงเสียดทาน (b) นิ้วแข็งมีแรงเสียดทาน (c) นิ้วอ่อน.....	7
รูปที่ 3 รูปแสดง wrench ของแรง a, b ,c ที่มีคุณสมบัติปิดของแรง (a) แรง a, b, c (b) คอนเวกซ์ฮัลของเวรนซ์.....	8
รูปที่ 4 รูปแสดงคุณสมบัติปิดของแรงของหุ่นยนต์สามนิ้ว (a) กรวยแรงเสียดทานทั้งสามตัดกันบนระนาบ (b) แรงทั้งสามลดในรูปของสองมิติ	9
รูปที่ 5 รูปแสดงระนาบที่ตัดผ่านขวและตัวอย่างตำแหน่งนิ้วหุ่นยนต์ที่สามารถวางได้ (a) ระนาบตัดแนวตั้ง (b) ระนาบตัดแนวนอน (c) ระนาบตัดแนวทแยง	11
รูปที่ 6 รูปแสดงทิศทางของระนาบที่ตัดผ่านรูปขวดในสามมิติ	12
รูปที่ 7 รูปแสดงสมาชิกของเซต S ที่อยู่ในระนาบการหยิบจับ Gi ของรูปขวด	13
รูปที่ 8 รูปแสดงรหัสเทียมขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาระนาบการหยิบจับแบบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวล	13
รูปที่ 9 รูปแสดง (a) จุดกลางของสามเหลี่ยมคุณสมบัติปิดของแรง (b) คะแนนของระนาบการหยิบจับแบบคิดระยะ	15
รูปที่ 10 รูปแสดง (a) ระบบการสแกนวัตถุของ KIT (b) Minolta VI900	16
รูปที่ 11 รูปแสดง (a) เครื่อง Kinect2 (b) Kinect for windows adapter	17
รูปที่ 12 รูปแสดงข้อมูลจาก Kinect2	17
รูปที่ 13 รูปแสดงแขนหุ่นยนต์ (Katana robotic arm).....	18
รูปที่ 14 รูปแสดง (a) กลไกของเฟืองตัวหนอน (b) มือจับสามนิ้วขณะกางแก (c) มือจับสามนิ้วขณะหุบเข้า.....	20
รูปที่ 15 รูปแสดงแบบร่างมือจับแบบสามนิ้ว ด้วยโปรแกรม Autodesk 3dsmax.....	20
รูปที่ 16 รูปแสดง (a) โครงฐานที่หัก (b) โครงฐานที่พิมพ์ซ้ำใหม่ (c) โครงฐานอลูมิเนียม	21
รูปที่ 17 รูปแสดงเบ้าหล่อซิลิโคน สำหรับปลายนิ้ว ที่ทำจากเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	21

รูปที่ 18	รูปแสดง (a) เครื่องพิมพ์สามมิติ (b) ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์.....	22
รูปที่ 19	รูปแสดงค่าพารามิเตอร์ Poisson-disk Sampling	23
รูปที่ 20	รูปแสดง (a) Poisson-disk Sampling (b) ก่อนใช้ Poisson-disk Sampling ของ CokePlasticSmallGrasp.....	24
รูปที่ 21	รูปแสดง (a) Poisson-disk Sampling (b) ก่อนใช้ Poisson-disk Sampling ของ LetterP	24
รูปที่ 22	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CokePlasticSmallGrasp.....	25
รูปที่ 23	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Dog.....	26
รูปที่ 24	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Fish.....	26
รูปที่ 25	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CatLying	27
รูปที่ 26	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Heart.....	27
รูปที่ 27	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Dwarf	28
รูปที่ 28	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ LetterP.....	28
รูปที่ 29	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Cube	29
รูปที่ 30	รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CokePlasticSmallGrasp ที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ.....	30
รูปที่ 31	รูปแสดงตัวอย่าง ArUco marker	31
รูปที่ 32	รูปแสดงค่าพารามิเตอร์ใน Surface Reconstruction : ball-pivoting	31
รูปที่ 33	รูปแสดงตำแหน่งติดตั้ง Kinect เครื่องที่ 1, 2 และสัญลักษณ์ ArUco ที่พื้นโต๊ะ.....	32
รูปที่ 34	รูปเปรียบเทียบแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Fish (รูปแถวบน) KIT 800 faces (รูปแถวล่าง) ข้อมูลจาก Kinect 800 faces	32
รูปที่ 35	รูปแสดงวัตถุที่ใช้ในการทดลอง จากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	33
รูปที่ 36	รูปแสดง (a) สภาพแวดล้อมในการทดลอง (b) แทนวางวัตถุทดลอง	34
รูปที่ 37	รูปแสดงขั้นตอนการทดสอบหยิบจับวัตถุ 1 ครั้ง	35
รูปที่ 38	รูปแสดงการทดลองหยิบวัตถุที่นับว่าไม่สำเร็จ	37

รูปที่ 39 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ Fish..... 38

รูปที่ 40 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ Dog 38

รูปที่ 41 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ CokePlasticSmallGrasp..... 39

รูปที่ 42 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ CatLying 39



บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้ผู้เขียนอธิบายถึงภาพรวมของงานวิจัยในหัวข้อที่จะนำเสนอ เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงพื้นฐานที่มาของปัญหา ความสำคัญ งานวิจัยที่ผ่านมา และลำดับเนื้อหาที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

1.1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทมากมายในชีวิตประจำวันของเรา ไม่ว่าจะเป็นหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรม หุ่นยนต์กู้ภัย หุ่นยนต์สำรวจอวกาศ หุ่นยนต์ทำความสะอาด หรือแม้กระทั่งของเล่นเด็ก แต่จะเห็นได้ชัดว่าหุ่นยนต์เหล่านี้ไม่มีมือ หรือมีมือแต่ทำงานได้ไม่ดี จึงทำให้หุ่นยนต์ไม่มีความสามารถในการหยิบจับวัตถุ ทั้ง ๆ ที่ความสามารถในการหยิบจับวัตถุควรจะเป็นความสามารถพื้นฐานที่หุ่นยนต์ควรมี เหมือนการเคลื่อนที่ การมองเห็น หรือการได้ยิน ดังเช่นในมนุษย์ ที่มีความสามารถเหล่านี้มาตั้งแต่เกิด ซึ่งการหยิบจับวัตถุเป็นความสามารถพื้นฐาน และมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันของทั้งมนุษย์และหุ่นยนต์ อาทิ หุ่นยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้มือคัดแยกผลิตภัณฑ์ และประกอบผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก ๆ ต่อวัน หุ่นยนต์กู้ภัยที่ต้องใช้มือที่มีความยืดหยุ่นต่อการทำงานในทุกสถานการณ์ หุ่นยนต์สำรวจอวกาศที่ต้องการความสามารถในการหยิบจับวัตถุใด ๆ เพื่อเก็บชิ้นส่วนหรือวัตถุที่ไม่รู้จักจากนอกโลก หุ่นยนต์รับใช้ที่ต้องมีความสามารถในการหยิบจับวัตถุและของใช้ต่าง ๆ ภายในบ้านได้ โดยไม่ทำให้วัตถุเสียหาย ซึ่งหุ่นยนต์ทุกแบบที่ยกตัวอย่างมานี้ ต่างก็ต้องการความแม่นยำและความรวดเร็วในการทำงานทุกชนิด

สำหรับงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน มือหุ่นยนต์สำหรับหยิบจับวัตถุแล้วแต่ออกแบบมาให้ใช้สำหรับงานหยิบจับวัตถุแบบเฉพาะเจาะจง จึงต้องมีรูปแบบหุ่นยนต์มากมายเพื่อหยิบจับวัตถุต่างชนิดกัน ทำให้ต้องมีรูปแบบหุ่นยนต์หลากหลายรูปแบบ และมีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง ส่วนหุ่นยนต์รับใช้ ก็ควรมีความสามารถหยิบจับสิ่งของได้หลากหลายรูปแบบ เพื่อให้เหมาะสมแก่การทำงานภายในบ้าน ดังนั้นหุ่นยนต์จึงจำเป็นต้องมีมือและขั้นตอนวิธี (Algorithm) ที่สามารถหยิบจับวัตถุที่หลากหลายได้ แต่ในปัจจุบันก็ยังไม่มียุ่นยนต์หรือขั้นตอนวิธีใด ที่สามารถหยิบจับวัตถุใด ๆ ก็ได้และสามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ เป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน อีกทั้งต้องการความรวดเร็ว และความแม่นยำสูง งานวิจัยทางด้านกรอกรหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์จึงเป็นงานที่ท้าทาย และมีนักวิจัยมากมายจากทั่วโลกที่พยายามเสนอวิธีแก้ไขปัญหานี้มานานหลายสิบปี

การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ (Grasping) คือการให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการหยิบจับวัตถุใด ๆ หรือยกวัตถุใด ๆ ขึ้นมาด้วยการใช้มือและนิ้วได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งหุ่นยนต์ต้องผ่านขั้นตอนตั้งแต่การรับรู้

สิ่งแวดล้อม การรู้จักวัตถุที่จะหยิบ (Object Recognition) การกำหนดเส้นทางเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุ และหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Path Planning) การวางแผนวางนิ้วไปบนวัตถุ (Grasp Planning) และยกวัตถุขึ้นมา (Grasp Execution) ซึ่งเมื่อจับวัตถุขึ้นมาแล้ววัตถุควรติดขึ้นมากับมือของหุ่นยนต์ ไม่ตกลงหรือลื่นหลุดออกจากมือได้โดยง่าย โดย [1-3] ได้นิยามคุณสมบัติที่ควรมีในการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ คือ การจับวัตถุให้อยู่ในสภาพสมดุล (Equilibrium) และเกิดคุณสมบัติปิดของแรง (Force-Closure) [4] ได้พิสูจน์ว่าในการหยิบจับวัตถุของมนุษย์นั้น ท่าทางการหยิบจับก็มีคุณสมบัติปิดของแรงเช่นกัน ด้วยนิยามของคุณสมบัติเหล่านี้ ทำให้เกิดมีงานวิจัยมากมายเสนอวิธีการหาตำแหน่งบนวัตถุสำหรับวางนิ้วมือหุ่นยนต์ ทั้งหาตำแหน่งการวางนิ้วที่เสถียรตามนิยามคุณสมบัติปิดของแรง และตำแหน่งการวางนิ้วที่ใกล้เคียงการหยิบจับแบบมนุษย์ แต่ในความเป็นจริงนั้นเมื่อใช้หุ่นยนต์เข้าไปจับวัตถุ หุ่นยนต์มักจะไม่สามารถทำได้จริง เนื่องจากปัญหาความคลาดเคลื่อน (Uncertainty) ภายในระบบมากมายที่อาจจะคาดเดาสาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากการรับรู้รูปร่างและตำแหน่งวัตถุที่ผิดพลาดซึ่งมักจะเกิดในอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) มากมาย เช่น กล้องสี (RGB-Camera), อุปกรณ์ตรวจจับระยะ (Depth Sensor), อุปกรณ์ตรวจจับแรง (Force Sensor) และอุปกรณ์ตรวจจับการสัมผัส (Tactile Sensor) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนแล้วแต่สร้างความคลาดเคลื่อนทั้งที่คาดเดาได้ และคาดเดาไม่ได้ รวมถึงความยากของกลไกการทำงานของมือหุ่นยนต์เองก็สร้างความคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน ดังนั้นความคลาดเคลื่อนเหล่านี้จึงเป็นอุปสรรคอย่างมากในการวางแผนการหยิบจับ และควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถหยิบจับวัตถุให้สำเร็จตามที่เรากำลังต้องการ

ด้วยปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการหาขั้นตอนวิธี สำหรับการวางแผนการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ โดยจะมุ่งเน้นไปที่หุ่นยนต์แบบนิ้วมือสามนิ้ว และนำเสนอระนาบสำหรับการหยิบจับ (Grasping plane) ที่ดี ซึ่งจะช่วยให้การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์มีโอกาสสำเร็จมากขึ้น แทนที่การวางแผนการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์แบบระบุตำแหน่งการวางนิ้วบนพื้นผิววัตถุ ในการวัดผลนั้น จะทำการทดลองบนหุ่นยนต์จริง เพื่อให้เห็นถึงปัญหาและผลลัพธ์ของขั้นตอนวิธีที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอ ในการใช้งานบนโลกจริง

1.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อหาท่าทางและการระบุตำแหน่งการวางนิ้วสำหรับการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ที่ดี หรือคือการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์มีคุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ โดย [4] ได้ระบุว่าท่าทางการหยิบจับวัตถุของมนุษย์นั้นก็มีคุณสมบัติปิดของแรงเช่นกัน ในงานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีการเสนอวิธีการหาตำแหน่งการวางนิ้วบนผิวสัมผัสของวัตถุ โดยใช้คุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งในช่วงแรกงานวิจัยส่วนใหญ่อาศัยกระบวนการเชิงวิเคราะห์ (Analytic Approach) เชิงคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ [5] บนปริภูมิ 2 มิติ [6] และปริภูมิ 3 มิติ [7] จนถึงมีติออนันต์

เพื่อระบุตำแหน่งการวางนิ้วมือของหุ่นยนต์ที่ดีที่สุดหรือหาได้ปริมาณมากในเวลาอันสั้น ต่อมาเมื่อหุ่นยนต์จริงเริ่มเป็นที่แพร่หลายการนำทฤษฎีมาใช้นับหุ่นยนต์จึงได้เกิดขึ้น แต่เมื่อได้เริ่มทำการวิจัยบนหุ่นยนต์จริง กลับพบว่า หุ่นยนต์ไม่สามารถหยิบจับวัตถุได้ตามทฤษฎี เนื่องจากหุ่นยนต์นั้นไม่สามารถวางนิ้วไปบนพื้นผิวสัมผัสวัตถุที่ระบุได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ด้วยปัญหาความยากทางกลไกการทำงานของมือหุ่นยนต์ และความไม่แม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัด ทำให้การระบุตำแหน่งของวัตถุคลาดเคลื่อน ไม่สามารถระบุการวางนิ้วของหุ่นยนต์ได้อย่างแน่ชัด และหุ่นยนต์ก็ไม่สามารถวางนิ้วไปบนตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง จึงเป็นไปได้ยากที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถหยิบจับวัตถุขึ้นมาได้สำเร็จ เพื่อแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ต่อมาได้มีอีกหลายงานวิจัยพยายามเสนอ รูปแบบในการอธิบายตำแหน่งการวางนิ้วของหุ่นยนต์ที่สามารถทนทานต่อความคลาดเคลื่อนได้มากขึ้น [8-11] ได้เสนอ บริเวณสัมผัสอิสระ (Independent Contact Regions) ซึ่งเป็นวิธีการหาบริเวณการวางนิ้วบนผิวสัมผัสวัตถุ แทนที่การนิยามตำแหน่งในการวางนิ้วด้วยจุด เพื่อช่วยให้ทนทานต่อความคลาดเคลื่อนในการวางนิ้วมือของหุ่นยนต์ บริเวณสัมผัสอิสระนิยามไว้ว่า ถ้าหุ่นยนต์วางนิ้ว ณ ตำแหน่งใด ๆ ภายในบริเวณสัมผัสอิสระได้ จะทำให้สามารถหยิบจับวัตถุขึ้นมาโดยยังคงมีคุณสมบัติปิดของแรง แต่วิธีนี้ใช้การคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณนาน โดยเฉพาะถ้านิ้วมือของหุ่นยนต์มีจำนวนมาก ยิ่งจะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณและทำให้ขนาดของพื้นที่การวางนิ้วบนวัตถุเล็กมากจนเป็นไปได้ยากที่จะนำไปใช้งานบนหุ่นยนต์, การกักขัง (Caging) [12-16] ได้เสนอการจำกัดการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้นิ้วกักขังวัตถุเป็นกรงขัง แทนที่การวางนิ้วไปที่พื้นผิววัตถุ และออกแรงบีบ วัตถุสามารถทนทานต่อแรงที่มากกระทำได้ตราบใดที่ยังคงอยู่ในกรงขัง ซึ่งกระบวนการวิธีกักขังนี้จะทำงานได้ดีกับวัตถุที่มีส่วนโค้งเว้า (Concave) แต่วัตถุในโลกจริงส่วนใหญ่กลับมีขนาดเล็กและมีส่วนโค้งเว้าน้อย และจำนวนนิ้วของหุ่นยนต์ที่ต้องเพียงพอต่อการสร้างกรงขัง รวมถึงระยะเวลาในการคำนวณที่นาน ด้วยข้อจำกัดที่ค่อนข้างมากทำให้การปฏิบัติบนโลกจริงเป็นไปได้ยาก [17] ได้เสนอการการแบ่งวัตถุเป็นกล่องขอบเขต (Bounding Box) ย่อย ๆ โดยแต่ละกล่องขอบเขตแทนพื้นที่ที่สามารถหยิบจับได้ โดยให้มือหุ่นยนต์กำไปที่กล่องขอบเขตนั้น ๆ โดยไม่ได้คำนึงถึงตำแหน่งในการวางนิ้ว ซึ่งทำให้ไม่สามารถทราบถึงตำแหน่งที่นิ้วมือวางอยู่ได้ ไม่สามารถคาดเดาความคลาดเคลื่อน และเอาไปคำนวณต่อได้ยาก, ต่อมาาระบบจำลองการหยิบจับวัตถุ (Grasping Simulation) [18, 19] ได้ถูกเริ่มนำเข้ามาใช้และเป็นที่นิยมมากขึ้น นักวิจัยทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) จึงหันมาใช้ระบบจำลองการจับวัตถุ เพื่อสร้างแบบจำลอง (Model) การเรียนรู้วิธีการหยิบจับวัตถุ จึงเกิดแนวคิดของการทำงานแบบเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ขึ้นมา [20-22] ได้เสนอวิธีการหยิบจับวัตถุแบบฐานการเรียนรู้ (Learning base) ขึ้น โดยการทดลองบนระบบจำลองการหยิบจับวัตถุ แต่เมื่อใช้งานบนหุ่นยนต์จริงก็พบว่าข้อมูลที่ได้จากระบบจำลองการหยิบจับวัตถุมีไม่เพียงพอ และไม่สอดคล้องกับข้อมูลในโลกจริง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาหุ่นยนต์จริงเริ่ม

มีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นรวมถึงแนวคิดของเครือข่ายสมอง (Neural Networks) กำลังเป็นที่นิยม [23] ได้เสนอการใช้หุ่นยนต์ 14 ตัวเรียนรู้การหยิบของซ้ำไปซ้ำมาเรื่อย ๆ เป็นเดือน ๆ เพื่อให้ได้วิธีการหยิบจับวัตถุที่ดี โดยแต่ละตัวจะแบ่งปันประสบการณ์ร่วมกัน แต่ก็ยังไม่สามารถแก้จุดด้อยของวิธีการแบบฐานการเรียนรู้ได้ การจะหยิบจับวัตถุใด ๆ จะต้องให้หุ่นยนต์ทำการเรียนรู้วิธีการหยิบจับวัตถุนั้นก่อนจึงจะหยิบจับวัตถุนั้นได้ รวมไปถึงไม่สามารถอธิบายเหตุผลที่สามารถหยิบจับวัตถุนั้นขึ้นมาได้ [4, 24] เสนอวิธีการหยิบจับเลียนแบบมนุษย์ โดยให้มนุษย์เป็นต้นแบบในการหยิบจับวัตถุโดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดบันทึกวิธีการในการหยิบจับของมนุษย์เพื่อถ่ายทอดสู่หุ่นยนต์ ฉะนั้น มือหุ่นยนต์จึงต้องถูกออกแบบมาให้ใกล้เคียงมือของมนุษย์เพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มือที่ทำได้ในปัจจุบันมีราคาที่สูงและยังไม่แพร่หลายจึงยังไม่ค่อยมีงานวิจัยมารองรับเท่าที่ควร และก็ยังต้องให้มนุษย์สอนใหม่ทุกครั้งเมื่อจะหยิบจับวัตถุชิ้นใหม่, [25] เสนอมือที่ยึดหยุ่นได้ และ [26] ได้เสนอมือหุ่นยนต์แบบครอบคลุม (Universal Gripper) โดยเป็นมือที่ไม่มีนิ้ว หุ้มด้วยยาง มีลักษณะคล้ายทรงกลมภายในบรรจุเม็ดพลาสติกขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งจะถูกทำให้แนบติดกับวัตถุ เมื่อถูกดูดอากาศออกไป มือแบบพิเศษเหล่านี้อาศัยความสามารถในการสัมผัสพื้นผิววัตถุได้มากขึ้น สร้างแรงเสียดทานได้มากขึ้น ทำให้มีโอกาสในการหยิบจับวัตถุสำเร็จมากขึ้น แต่รูปแบบของมือเหล่านี้ยังไม่มีโมเดลทางคณิตศาสตร์หรือฟิสิกส์มารองรับ ทำให้ยากต่อการคำนวณ หรือสร้างระบบจำลองการหยิบจับวัตถุ จึงไม่สามารถวางแผนการจับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุปงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถถูกจัดได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกมีพื้นฐานจากการวิเคราะห์ (Analytical Approach) และประเภทที่สองใช้การประมวลผลข้อมูลจากการทดลองเป็นหลัก (Empirical Approach) โดยประเภทแรกอาศัยพื้นฐานความเข้าใจทางทฤษฎีการจับ ที่อยู่บนหลักการทางฟิสิกส์ วิธีวางแผนการจับประเภทนี้จึงจำกัดเฉพาะกรณีง่ายที่ใช้สมมุติฐานเป็นตัวกำหนดให้สร้างแบบจำลองได้ การพิจารณาเงื่อนไขในโลกจริงเป็นไปได้อย่างจำกัด เช่น รูปร่างของวัตถุที่ไม่สามารถระบุได้อย่างแม่นยำ ความคลาดเคลื่อนของการควบคุมหุ่นยนต์ การระบุผลจากแรงเสียดทานที่คลาดเคลื่อน ฯลฯ ส่วนประเภทที่สองเน้นการทำงานบนข้อมูลของการจับจริงเป็นหลัก เช่น การเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของการจับและความสำเร็จในการจับ แนววิธีลักษณะนี้สามารถให้การวางแผนการจับที่ใช้เงื่อนไขของโลกจริงได้ดีกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่ออกแบบการทดลองให้ครอบคลุมเงื่อนไขที่ต้องการ อย่างไรก็ตามแนววิธีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่มากในการนำไปใช้ในกรณีที่แตกต่างไปมากจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ เพราะไม่มีส่วนพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับการจับเป็นฐานให้ทำการขยายผลต่อ (Generalization) นอกจากนี้การที่ต้องทดลองเก็บข้อมูลให้ได้เพียงพอก็เป็นภาระอย่างมาก

จากที่ได้กล่าวมาจึงนำไปสู่หัวข้อของงานวิจัยนี้ ที่มีแนวคิดในการรวมข้อดีของทั้งสองแนวทาง โดยมีเป้าหมายคือการหาวิธีวางแผนการจับที่ผนวกการใช้ข้อมูลโลกจริงกับการใช้ทฤษฎีการจับ โดยจะพิจารณากรณีการจับด้วยสามนิ้ว แนวคิดเพิ่มเติมและทฤษฎีการหยิบจับวัตถุด้วยหุ่นยนต์แบบสามนิ้วที่ใช้เป็นพื้นฐานจะได้รับการอธิบายในบทต่อไป

1.3. การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์ และการทดสอบการทำงานและสรุปผล

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะนำเสนอทฤษฎี บทความ นิยาม งานวิจัยต่าง ๆ ที่เป็นแนวคิด และนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มาอธิบายเพื่อสร้างความเข้าใจก่อนจะเข้าสู่บทถัดไป
2. ขั้นตอนการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์ ในส่วนนี้จะนำเสนอแนวคิดและวิธีการแก้ไขปัญหา รวมถึงทฤษฎีการแก้ปัญหาที่วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอ
3. การทดสอบการทำงานและสรุปผล ในส่วนนี้จะอธิบายให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึง หลักการ และขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง และเปรียบเทียบผลการทดลอง เพื่อพิสูจน์ถึงความถูกต้องของแนวคิดและทฤษฎีที่ได้นำเสนอในบทก่อนหน้า

บทที่ 2

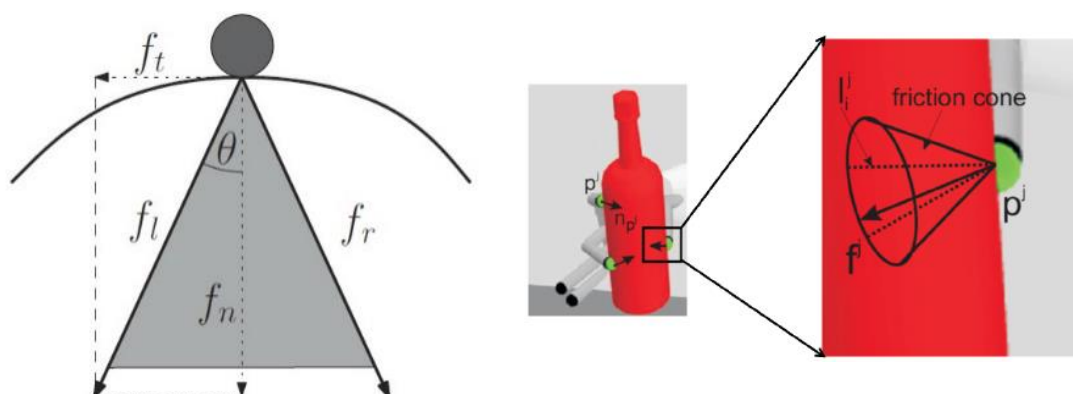
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้เขียนอธิบายถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ ที่จำเป็นต้องทำความเข้าใจเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการวิธีในบทถัดไป ซึ่งในหัวข้อที่ 2.5 ได้อธิบายทฤษฎีที่เป็นสาระสำคัญที่สร้างแรงบันดาลใจให้กับวิทยานิพนธ์นี้

2.1. กรวยของแรงเสียดทาน (Friction Cone)

ในการหยิบจับวัตถุ นั้นจะสัมผัสอยู่ ณ บริเวณผิวของวัตถุด้วยแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวของนิ้ว และลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ณ บริเวณนั้น ๆ และออกแรงไปที่ผิวสัมผัสวัตถุ ณ ตำแหน่งนั้นโดยไม่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ แรงจะสามารถเกิดขึ้นได้ภายในกรวยของแรงเสียดทาน (Friction cone) โดยขนาดของกรวยจะขึ้นกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างนิ้วมือของหุ่นยนต์และพื้นผิวของวัตถุ

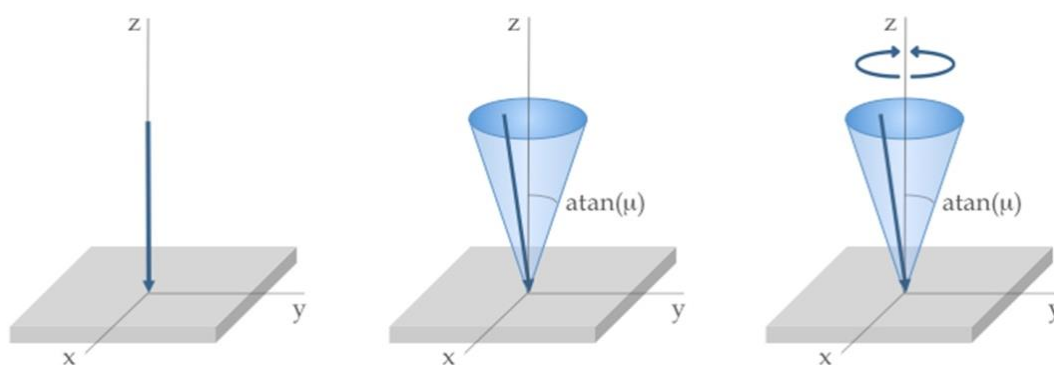
แรงที่นิ้วกระทำต่อผิวสัมผัสวัตถุ นั้นจะสามารถอธิบายได้ด้วยกรวยที่มีจุดยอดอยู่ที่ผิวสัมผัสวัตถุ และมีแกนกลางของกรวยตั้งฉากกับผิวสัมผัสวัตถุ ซึ่งเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ [5] แรงลัพธ์ที่กระทำต่อผิวสัมผัสวัตถุจะสามารถเกิดขึ้นได้ทุกทิศทางภายในในกรวยแรงเสียดทาน โดยกรวยมีขนาดครึ่งมุมยอด (Half Friction cone) $\theta = \tan^{-1}\mu$ โดย θ คือขนาดครึ่งมุมยอดของกรวย และ μ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างนิ้วมือของหุ่นยนต์และพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งในการปฏิบัติมักใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่น้อยกว่าความเป็นจริงเพื่อให้แน่ใจว่าแรงที่กระทำสามารถอยู่ภายในกรวยแรงเสียดทานตามทฤษฎี



รูปที่ 1 แรงที่นิ้วกระทำต่อวัตถุภายในกรวยแรงเสียดทาน

2.2. แบบจำลองนิ้วสำหรับหุ่นยนต์ (Finger Model)

การวิเคราะห์รูปแบบของแรงที่นิ้วหุ่นยนต์กระทำต่อผิวสัมผัสวัตถุนั้นขึ้นอยู่กับแบบจำลองนิ้วสำหรับหุ่นยนต์ โดยแบบจำลองนิ้วสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ นิ้วอ่อน (Soft-Finger Contact Model) รูป 2(c) และนิ้วแข็ง (Hard-Finger Contact Model) นิ้วแข็งคือนิ้วที่สามารถสร้างแรงที่จุดสัมผัสได้เพียงอย่างเดียวไม่สามารถออกแรงบิดได้ นิ้วอ่อนคือนิ้วที่สามารถสร้างแรง (Force) และแรงบิด (Torque) ที่จุดสัมผัสได้ เช่นนิ้วที่ทำจากวัสดุยาง เป็นต้น โดยแบบจำลองนิ้วแข็งสามารถแบ่งย่อยได้เป็นอีกสองประเภทคือ ผิวสัมผัสไร้แรงเสียดทาน รูป 2(a) และผิวสัมผัสแบบมีแรงเสียดทาน รูป 2(b) แบบจำลองนิ้วแข็งแบบผิวไร้แรงเสียดทานคือผิวสัมผัสของนิ้วไม่มีแรงเสียดทานหรือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นศูนย์ ทำให้สามารถออกแรงตั้งฉากกับผิววัตถุเป็นเส้นแรงได้เพียงอย่างเดียว ส่วนนิ้วแข็งแบบมีแรงเสียดทานจะสามารถออกแรงได้ภายในกรวยแรงเสียดทาน ซึ่งขนาดของกรวยเป็นไปตามสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแรงเสียดทานซึ่งเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่แบบจำลองแบบนิ้วแข็งแบบมีแรงเสียดทาน



รูปที่ 2 รูปแบบจำลองนิ้ว (a) นิ้วแข็งไร้แรงเสียดทาน (b) นิ้วแข็งมีแรงเสียดทาน (c) นิ้วอ่อน

2.3. เวนช์ (Wrench)

ในการออกแรงของนิ้วหุ่นยนต์ต่อผิวสัมผัสวัตถุ จะทำให้เกิดแรงสองแรงคือแรงลัพธ์ (Force) และแรงบิดลัพธ์ (Torque) โดยแรงบิดลัพธ์ $\text{Torque} = r \times f$ เมื่อ Torque คือแรงบิด, r คือตำแหน่งจุดสัมผัสเทียบกับจุดกำเนิด และ f คือแรงที่กระทำที่จุดสัมผัส ซึ่งแรงและแรงบิดลัพธ์ มักจะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันเสมอ งานวิจัยทางด้านการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์จึงนิยามนำมาเขียนรวมกันใหม่แล้วนิยามเรียกว่าเว็นช์ (Wrench) $\text{Wrench} = [F, \text{Torque}]$ ซึ่งในการวิเคราะห์บนปริภูมิสองมิตินั้น แรงลัพธ์และแรงบิดลัพธ์จะมีขนาดเวกเตอร์เป็นสองมิติและหนึ่งมิติ เมื่อเขียนรวมกันจะทำให้เว็นช์เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดสามมิติ ในการวิเคราะห์บนปริภูมิสามมิติ ทั้ง

แรงลัพธ์และแรงบิดลัพธ์จะมีขนาดเวกเตอร์เป็นสามมิติ เมื่อเขียนรวมกันจะทำให้เวรณซ์เป็นเวกเตอร์ที่มีขนาดหกมิติ

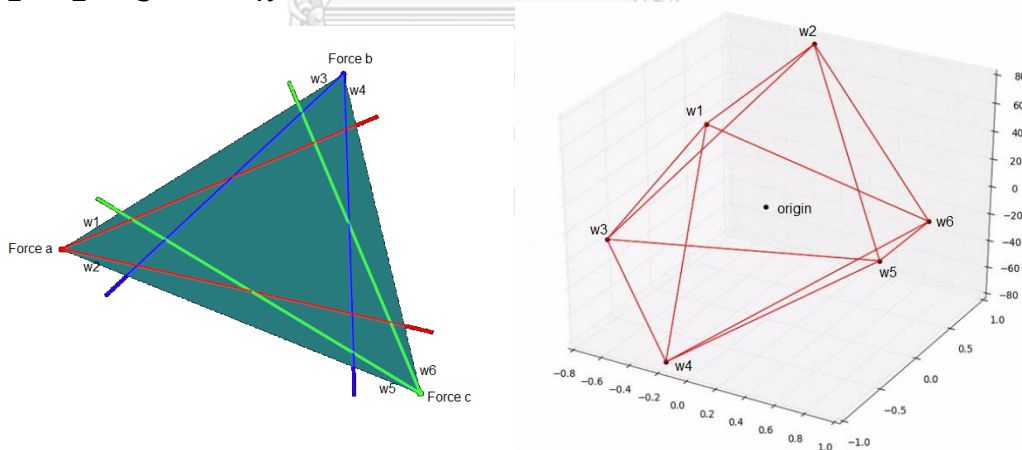
2.4. คุณสมบัติปิดของแรง (Force Closure)

ในการหยิบจับวัตถุที่วัตถุหุ่นยนต์ต้องสามารถยกวัตถุขึ้นมาได้ โดยที่วัตถุนั้นไม่ลื่นหรือหลุดไปจากมือของหุ่นยนต์โดยง่าย และวัตถุต้องหยุดอยู่หนึ่งเมื่อเทียบกับมือของหุ่นยนต์ ดังนั้นคุณสมบัติที่ควรจะมีในการหยิบจับวัตถุคือ [3] คุณสมบัติปิดของแรง (Force Closure) ซึ่งคุณสมบัตินี้ยังเป็นรากฐานของงานวิจัยทางด้านกรหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยช่วงหลัง [4] ได้ให้บทสรุปว่าท่าทางการหยิบวัตถุของมนุษย์นั้นก็ยังมีคุณสมบัติปิดของแรงเช่นกัน

คุณสมบัติปิดของแรงนั้นคือนิ้วของหุ่นยนต์เมื่อหยิบจับวัตถุขึ้นมา นิ้วแต่ละนิ้วต้องสามารถออกแรงต้าน เวรณซ์ภายนอกที่กระทำในทิศทางต่าง ๆ ได้ ซึ่งจะถูกนิยามด้วยทฤษฎีบทที่ 1 และ 2

ทฤษฎีบทที่ 1 เงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงนั้นคือ มีผลรวมบวกเชิงเส้นของเวรณซ์ตั้งต้นที่มีค่าเท่ากับศูนย์ และเวรณซ์ตั้งต้นแผ่ทั่วปริภูมิเวรณซ์

ทฤษฎีบทที่ 2 ระบบของเวรณซ์ $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ จะมีคุณสมบัติปิดของแรงก็ต่อเมื่อจุดกำเนิดของปริภูมิเวรณซ์อยู่ในภายในของคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ของเวรณซ์ $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$



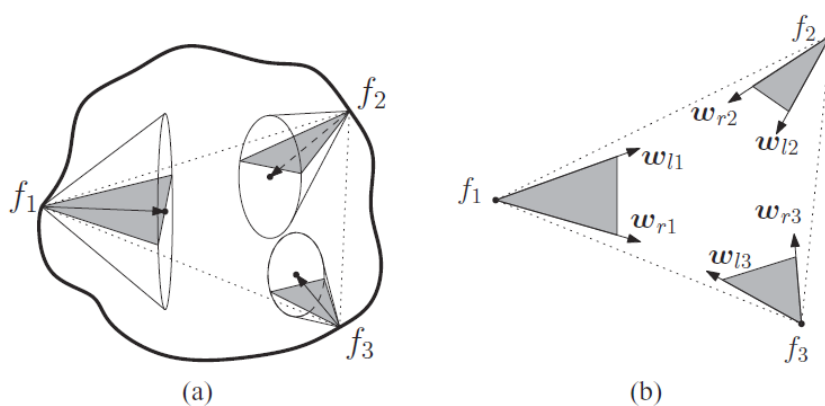
รูปที่ 3 รูปแสดง wrench ของแรง a, b, c ที่มีคุณสมบัติปิดของแรง (a) แรง a, b, c (b) คอนเวกซ์ฮัลล์ของเวรณซ์

รูป 3(a) แสดงแรง a, b, c ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของเวรณซ์ 6 เวรณซ์คือ w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 และ w_6 เมื่อสร้างคอนเวกซ์ฮัลของเวรณซ์ 3(b) จะเห็นว่าจุดกำเนิดของปริภูมิเวรณซ์ อยู่ในคอนเวกซ์ฮัลของเวรณซ์นั้นแสดงให้เห็นว่าแรงทั้งสามนี้มีคุณสมบัติปิดของแรง

2.5. คุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ้มนยนต์สามนิ้ว (Three-Finger Force Closure)

คุณสมบัติปิดของแรงเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่หุ้มนยนต์ต้องมีการหยิบจับวัตถุ โดยทฤษฎีบทที่ 1 และ 2 เป็นเงื่อนไขพื้นฐานในการวิเคราะห์คุณสมบัติปิดของแรงของหุ้มนยนต์หลายนิ้ว ต่อมาหลายงานวิจัยได้เสนอขั้นตอนวิธีเพื่อลดภาระเวลาในการคำนวณ และลดความซับซ้อนของปัญหาในการวิเคราะห์เงื่อนไขคุณสมบัติปิดของแรงลง โดยเสนอเงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับตรวจสอบคุณสมบัติปิดของแรงโดยพิจารณาแยกในหุ้มนยนต์ 2, 3, 4, ... , n นิ้ว

ซึ่ง [27] ได้แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ้มนยนต์สามนิ้ว จะเกิดขึ้นอยู่บนระนาบ จึงได้เสนอเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ้มนยนต์สามนิ้ว เพื่อลดปัญหาความซับซ้อนในการวิเคราะห์คุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งสามารถลดความซับซ้อนของปัญหาจากปริภูมิ 3 มิติลงมาเป็นปริภูมิ 2 มิติได้ดังทฤษฎีบทที่ 3 และ 4



รูปที่ 4 รูปแสดงคุณสมบัติปิดของแรงของหุ้มนยนต์สามนิ้ว (a) กรวยแรงเสียดทานทั้งสามตัดกันบนระนาบ (b) แรงทั้งสามลดในรูปของสองมิติ

ทฤษฎีบทที่ 3 เงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ้มนยนต์สามนิ้ว คือ มีจุดตัดอยู่ในระนาบที่เกิดจากกรวยแรงเสียดทานสองด้านทั้งสาม

ทฤษฎีบทที่ 4 เงื่อนไขที่เพียงพอสำหรับคุณสมบัติปิดของแรงแบบหุ้มนยนต์สามนิ้ว คือ มีจุดตัดอยู่ในสามเหลี่ยมที่เกิดจากกรวยแรงเสียดทานด้านในทั้งสาม

บทที่ 3

ระนาบการหยิบจับแบบสามนิ้ว (Three-Finger Grasping Plane)

ในบทนี้ผู้เขียนอธิบายถึงแนวคิดและที่มาที่ไปของระนาบการหยิบจับแบบสามนิ้วซึ่งอ้างอิงมาจากทฤษฎีคุณสมบัติปิดของแรงในบทที่ 2.5 โดยจะแบ่งระนาบการหยิบจับออกเป็นสองแบบคือ ระนาบแบบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ และระนาบแบบคิดระยะ

3.1. แนวคิดของระนาบการหยิบจับ

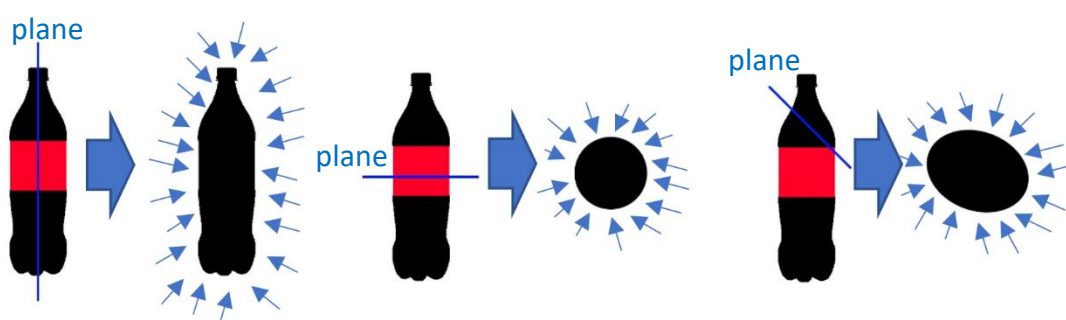
เป้าหมายของงานวิจัยคือ การนำเสนอวิธีการหาระนาบการหยิบจับวัตถุ (Grasping Plane) ที่มีโอกาสสูงในการสร้างท่าจับแบบสามนิ้วในปริมาณมาก ๆ ซึ่งระนาบนั้น ๆ มีอยู่มากมาย และแต่ละระนาบให้โอกาสความสำเร็จที่ต่างกันไป โดยข้อมูลนำเข้าคือข้อมูลโมเดลสามมิติของวัตถุ และข้อมูลขาออกคือระนาบการหยิบจับวัตถุที่ดี

สำหรับการวางแผนการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำเสนอมานั้น เนื้อหาหลักๆคือการนำเสนอขั้นตอนวิธีที่ทนทานต่อความไม่แน่นอนทั้งหลาย เช่น ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor), การระบุตำแหน่งวัตถุที่คลาดเคลื่อน และความไม่แม่นยำในการวางนิ้วมือของหุ่นยนต์ แต่สิ่งคล้ายคลึงกันคืองานวิจัยเหล่านี้ยังคงวิเคราะห์หาตำแหน่งการวางนิ้วของหุ่นยนต์โดยแยกวิเคราะห์ในแต่ละนิ้ว ซึ่งทำให้การระบุตำแหน่งของนิ้วใด ๆ ที่คลาดเคลื่อนนั้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของนิ้วอื่น ๆ ด้วย ทำให้โอกาสสำเร็จในการหยิบวัตถุนั้นลดลง ยกตัวอย่างเช่น การวางนิ้วไป ณ ตำแหน่งที่หนึ่งแต่นิ้วไม่สามารถวางไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนผิววัตถุได้อันเนื่องมาจากตำแหน่งของวัตถุที่คลาดเคลื่อน เมื่อวางนิ้วไปแล้ววัตถุอาจเลื่อนไกลไปจากตำแหน่งเดิม ทำให้ไม่สามารถวางนิ้วต่อ ๆ ไปยังตำแหน่งที่วิเคราะห์ไว้ได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางอื่นเพื่อใช้ในการวางแผนการวางนิ้วของหุ่นยนต์ แทนที่การวิเคราะห์แบบแยกนิ้ว โดยจะเรียกระบนาบการหยิบจับวัตถุ ซึ่งระนาบนี้เป็นระนาบที่ใช้สำหรับวางแผนการวางนิ้วของหุ่นยนต์ โดยรับประกันว่าสามารถสร้างท่าจับที่มีคุณสมบัติปิดของแรงได้เมื่อหุ่นยนต์สามารถวางนิ้วในระนาบนี้

จากที่ [27] ได้เสนอเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอในการสร้างคุณสมบัติปิดของแรงแบบมีอหุ่นยนต์สามนิ้วจากทฤษฎีบทที่ 3 และ 4 ซึ่งสามารถลดปัญหาการคำนวณคุณสมบัติปิดของแรงจากปริภูมิสามมิติไปยังสองมิติได้ โดยที่จุดสัมผัสระหว่างนิ้วของหุ่นยนต์กับผิวสัมผัสของวัตถุจะนิยามให้มีกรวยแรงเสียดทานสองด้าน (Dual Side Friction Cone) ซึ่งเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ โดยกรวยแรงเสียดทานหนึ่งจะมีทิศทางตามแนวแรงที่นิ้วของหุ่นยนต์กระทำต่อวัตถุ และมีทิศพุ่งเข้าไปในวัตถุ ส่วนอีกกรวยหนึ่งจะมีทิศพุ่งออกจากวัตถุ โดยเมื่อเกิดคุณสมบัติปิดของแรงจะสามารถสร้างระนาบที่

ตัดกับจุดสัมผัสระหว่างนิ้วของหุ่นยนต์กับผิววัตถุทั้งสามจุดได้ โดยกรวยแรงเสียดทานของทั้งสามจุดสัมผัสก็ตัดกับระนาบนั้นด้วย ทำให้เห็นว่าคุณสมบัติปิดของแรงของมือหุ่นยนต์แบบสามนิ้วจะเกิดขึ้น โดยการวางตัวบนระนาบเดียวกันของกรวยเสียดทานทั้งสาม จึงสามารถอธิบายการจับวัตถุของมือหุ่นยนต์สามนิ้วด้วยระนาบ

เมื่อวิเคราะห์การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์แบบสามนิ้วด้วยระนาบ การวาดระนาบตัดผ่านวัตถุ ณ ตำแหน่งและทิศทางต่างจะสามารถสร้างระนาบการหยิบจับที่แตกต่างกันได้ โดยแต่ละระนาบนี้ จะสามารถสร้างท่าจับที่มีลักษณะและปริมาณที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปแสดงระนาบที่ตัดผ่านขวดและตัวอย่างตำแหน่งนิ้วหุ่นยนต์ที่สามารถวางได้ (a) ระนาบตัดแนวตั้ง (b) ระนาบตัดแนวนอน (c) ระนาบตัดแนวทแยง

จากรูปขวดเมื่อตัดระนาบไปยังทิศทางแนวตั้งของขวด รูป 5(a) จะสามารถออกแรงกระทำตั้งฉากที่ผิวของขวดได้ แต่ความหลากหลายของทิศทางแรงนั้นเกิดขึ้นน้อยกว่า รูป 5(b) และ 5(c) ที่ภาคตัดขวางมีลักษณะที่คล้ายวงกลม ทำให้ทิศทางของแรงที่สร้างได้มีความหลากหลายมากกว่า

เมื่อพิจารณานิ้วหุ่นยนต์แบบนิ้วเชิงมีแรงเสียดทานจะได้นิ้วสามารถออกแรงกระทำต่อวัตถุได้ภายในกรวยแรงเสียดทาน ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ทำให้พิจารณาได้ว่าระนาบการหยิบจับนั้นสามารถมีความหนาได้โดยแปรผันตรงกับความกว้างของกรวยแรงเสียดทานหรือแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างนิ้วมือของหุ่นยนต์กับพื้นผิวของวัตถุ โดยวิธีการวัดคุณภาพของระนาบการหยิบจับในแต่ละระนาบจะทำการอธิบายในบทถัดไป

เมื่อสร้างระนาบการหยิบจับในทุกทิศทาง จะสามารถให้คะแนนโอกาสความสำเร็จในการจับวัตถุที่มีคุณสมบัติปิดของแรง ในทุกทิศทางได้ ซึ่งทิศทางนี้หมายถึงแกนที่ตั้งฉากกับระนาบของการหยิบจับ



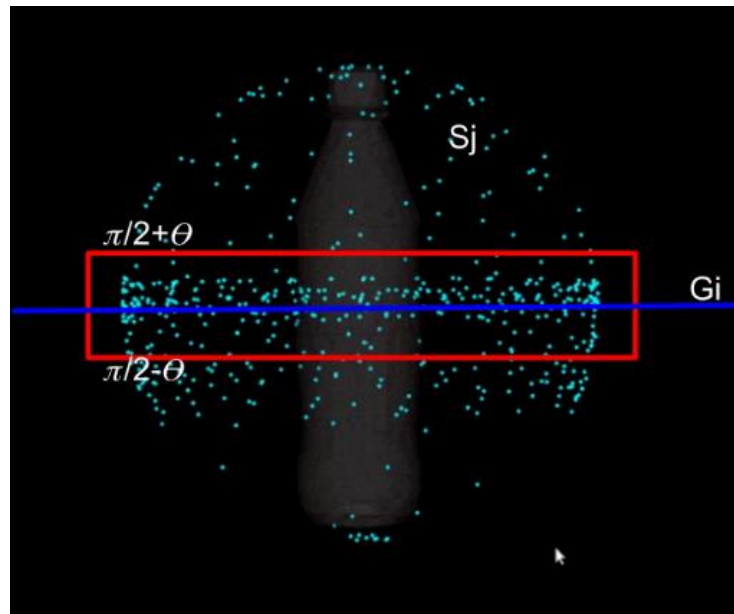
รูปที่ 6 รูปแสดงทิศทางของระนาบที่ตัดผ่านรูปขวดในสามมิติ

3.2. วิธีการหาคะเนาบการหีบจับแบบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวล

ในส่วนนี้จะทำการอธิบายถึงขั้นตอนวิธีในการหาคะเนาบของระนาบการหีบจับวัตถุ โดยจะมุ่งเน้นเฉพาะระนาบที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุเท่านั้น ซึ่งข้อดีของการหีบจับวัตถุโดยใช้แรงที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวลคือ ท่าทางการหีบจับวัตถุจะสามารถทนทานต่อแรงทางพลศาสตร์ที่กระทำต่อวัตถุเมื่อยกวัตถุขึ้นได้ ซึ่งทำให้โอกาสสำเร็จในการหีบจับวัตถุนั้นมีมากขึ้นและเป็นลักษณะพื้นฐานที่นิยมใช้ในการหีบจับวัตถุของหุ่นยนต์

ข้อมูลนำเข้าจะใช้เพียง normal vector หรือคือทิศทางของแรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิววัตถุ จุด S_j ในรูปที่ 7 โดย S_j นี้จะถูกสร้างขึ้นมาให้กระจายตัวอยู่ทั่ว ๆ ทั่วผิวสัมผัสวัตถุแบบความหนาแน่นคงที่ (Uniformly) ส่วน G เป็นเซตของระนาบการหีบจับ โดยขนาดของ G สามารถกำหนดให้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความละเอียดที่สนใจหรือระยะเวลาการทำงานที่ต้องการ

กะเนาบของแต่ละระนาบการหีบจับ G_i จะขึ้นกับจำนวน normal vector ของผิวสัมผัสวัตถุ S ซึ่งหมายถึง ระนาบใด ๆ ที่วาดผ่านเซตของ S กะเนาบของระนาบนั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนสมาชิกที่ระนาบนั้นวาดผ่าน โดยเมื่อก้าวถึงมือหุ่นยนต์แบบนิ้วแข็งมีแรงเสียดทาน แรงยังคงสามารถออกแรงได้ภายในกรวยแรงเสียดทาน ทำให้ S_j ยังคงเป็นสมาชิกของ G_i ก็ต่อเมื่อ S_j มีระยะห่างจาก ระนาบ G_i ไม่เกิน $\pi/2 + \theta$ ถึง $\pi - \theta$ โดย θ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างนิ้วมือของหุ่นยนต์กับพื้นผิวของวัตถุ S_j ในกรอบสีแดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 รูปแสดงสมาชิกของเซต S ที่อยู่ในระนาบการหยิบจับ G_i ของรูปขวด

Algorithm 1 Score of each Grasping plane

- 1: Input: Grasped object mesh model
 - 2: Output: Grasp score array C
 - 3: Let S be the set of contact normals sampled uniformly from the object surface.
 - 4: Let G be the set of plane orientations each of which is represented by the plane normal vector.
 - 5: **for** each G_i in G **do**
 - 6: **for** each S_j in S **do**
 - 7: Increase $C[i]$ if the angle between S_j and G_i is in the interval $[\pi/2 - \theta, \pi/2 + \theta]$.
 - 8: **end for**
 - 9: **if** $C[i] < 3$ **then** set $C[i]$ to zero
 - 10:
-

รูปที่ 8 รูปแสดงรหัสเทียมขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาระนาบการหยิบจับแบบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวล

พิจารณาเพิ่มเติมเนื่องจากการหีบจับแบบหุ่นยนต์สามนิ้ว จำนวนนิ้วขั้นต่ำที่ใช้คือสามนิ้ว ดังนั้นในกรณีที่คะแนนของ G_i หรือ G_i มีสมาชิกในเซต S น้อยกว่าสาม ก็คือระนาบนั้นไม่สามารถวางนิ้วหุ่นยนต์มั้งสามนิ้วได้ ดังนั้นจะให้กรณีนี้มีคะแนนเป็นศูนย์

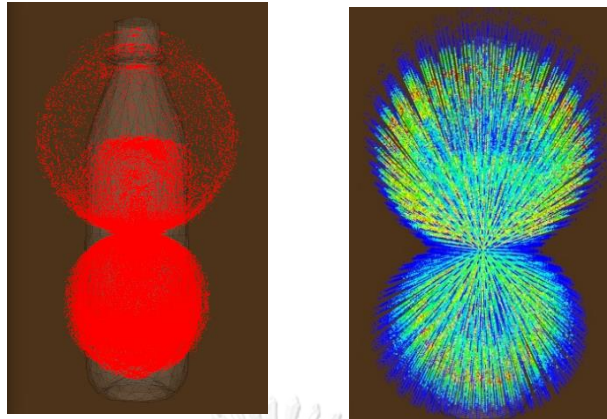
ผลลัพธ์คะแนนของระนาบการหีบจับจะนำเสนอออกมาในรูปแบบของ แผนภูมิความร้อนทรงกลม (Heatmap Grasping sphere) โดยแต่ละระนาบจะนำเสนอด้วย normal vector ของระนาบ และสีของแผนภูมิความร้อนอธิบายถึงคะแนนของแต่ละระนาบ โดยจะนำเสนอในบทถัดไป

3.3. วิธีการหาระนาบการหีบจับแบบคิดระยะ

แม้ว่าในทางปฏิบัติการหีบจับวัตถุโดยการผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุนั้นจะสามารถทนทานต่อแรงทางพลศาสตร์ได้ดี แต่ยังมีกรณีการหีบจับที่ไม่สามารถจับไปที่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลได้ เช่น ในกรณีที่วัตถุมีขนาดใหญ่กว่าระยะของนิ้วหุ่นยนต์ หรือวัตถุที่มีรูปทรงยาว ๆ เป็นต้น ทำให้นอกจากจะวิเคราะห์ทิศทางในการเข้าจับวัตถุแล้วยังคงต้องพิจารณาถึงระยะที่เหมาะสมในการหีบจับวัตถุ

ระนาบการหีบจับในทิศทางใด ๆ ที่ตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ โดยสมาชิกของระนาบนั้น S ที่อยู่ในกรอบสีแดงของระนาบ G_i รูปที่ 7 ระนาบในทิศทางนั้นสามารถสร้างระนาบแยกย่อยได้ในทิศทางเดียวกันคือระยะห่างในทิศทางบวกและลบ $G_i(-n, \dots, 2, 1, 2, \dots, n)$ ระยะห่างระหว่างระนาบในทิศทางเดียวกันสามารถกำหนดได้ตามความละเอียดที่สนใจ โดยคะแนนของแต่ละระนาบ $G_i(n)$ จะมีค่าตามจำนวนตำแหน่งผิวสัมผัสที่ระนาบนั้นตัดผ่าน

จากรูปที่ 9 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ของรูปขวด รูป 9(a) แต่ละจุดแสดงจุดตัดทั้งหมดของแรงจากท่าจับแบบสามนิ้วที่มีคุณสมบัติปิดของแรง รูป 9(b) คะแนนของระนาบการหีบจับโดยนำเสนอในรูปแบบของ normal vector ของระนาบ ซึ่งในระนาบทิศทางเดียวจะแบ่งย่อยด้วยระนาบที่มีระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุที่ต่างกัน โดยสีแดงบ่งบอกถึงคะแนนที่ดีและสีน้ำเงินบ่งบอกถึงคะแนนที่ไม่ดี ซึ่งผลลัพธ์ที่ดีที่ควรจะเป็นนั้น กลุ่มของระนาบที่มีคะแนนสูง รูป 9(b) ควรมีตำแหน่งสอดคล้องกับ รูป 9(a)



รูปที่ 9 รูปแสดง (a) จุดกลางของสามเหลี่ยมมุมสมบัติปิดของแรง (b) คะแนนของระนาบการหนีบจับแบบคิด

ระยะ



บทที่ 4

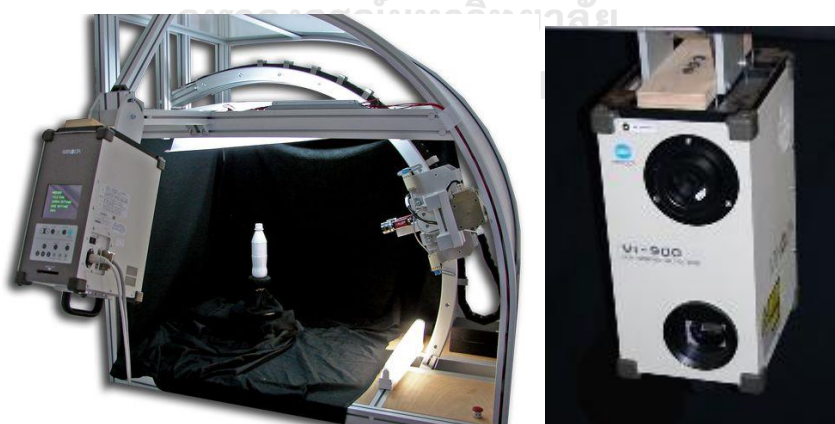
การทดสอบการทำงาน

ในบทนี้จะอธิบายถึงวิธีการและขั้นตอนในการวัดผลของวิธีการการที่ได้นำเสนอไปในบทก่อนหน้านี้ โดยการวัดผลจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การวิเคราะห์ระนาบการหยิบจับบนวัตถุต่าง ๆ และการทำการทดลองบนหุ่นยนต์จริงเพื่อให้หุ่นยนต์ได้หยิบวัตถุขึ้นมา โดยจะเริ่มจากการอธิบายถึงรายละเอียดของเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลองเป็นอันดับแรก

4.1. ข้อมูล เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้

4.1.1. KIT Object Database

ข้อมูลนำเข้าของวัตถุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะนำมาจาก KIT object database ซึ่ง KIT object database เป็น website ที่เปิดให้ download ข้อมูลวัตถุต่าง ๆ ที่แสกนมาด้วยเครื่องสแกนวัตถุสามมิติแบบความละเอียดสูง ซึ่งเป็นที่นิยมในหมู่การวิจัยเรื่องการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ การสแกนวัตถุของ KIT นั้นทำด้วยเครื่อง Minolta VI900 เป็นเครื่องเลเซอร์สแกนที่มีความแม่นยำสูง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร ข้อมูลวัตถุที่ที่ทาง KIT ให้นำนั้นจะเป็น mech model แบบมี texture โดยจะมีความละเอียดให้เลือก เช่น ความละเอียดดั้งเดิมจากการแสกนซึ่งมีความละเอียดสูง, ขนาดความละเอียด 5000 faces และ ขนาด 800 faces เป็นต้น



รูปที่ 10 รูปแสดง (a) ระบบการแสกนวัตถุของ KIT (b) Minolta VI900

4.1.2. Kinect2 for Xbox one

Kinect2 เป็นอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ที่สามารถถ่ายภาพ RGB และให้ข้อมูลความลึกของภาพ depth image ได้ เป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาให้กับเครื่องเล่นเกม Xbox one เพื่อใช้ในการอ่านท่าทางการเคลื่อนไหวของผู้เล่น

คุณภาพของภาพจากกล้องสี (RGB camera) จะให้ความละเอียดอยู่ที่ 1920x1080 พิกเซล ความถี่ 30 เฟรมต่อวินาที และกล้องความลึกซึ่งใช้เทคโนโลยีแบบไทม์ออฟไฟลท์ (Time-of-flight) จะให้ความละเอียดที่ 512x424 พิกเซล ความถี่ 30 เฟรมต่อวินาที โดยมาระยะทำการใกล้สุดที่ 50 เซนติเมตร

ในงานวิจัยนี้ได้นำความสามารถของการอ่านค่า ความลึกของภาพมาใช้งาน โดยการใช้งานร่วมกับ computer นั้นต้องใช้สายแปลง (Kinect for windows adapter) ร่วมด้วยซึ่งจะเชื่อมต่อผ่านพอร์ต usb เวอร์ชัน 3.0 และใช้ library Microsoft Kinect Sdk ในการรับข้อมูลจาก Kinect



รูปที่ 11 รูปแสดง (a) เครื่อง Kinect2 (b) Kinect for windows adapter



รูปที่ 12 รูปแสดงข้อมูลจาก Kinect2

จากรูปที่ 12 แสดงข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Kinect2 โดยรูปซ้ายบนเป็นข้อมูลภาพที่ได้จากการฉายด้วยไฟอินฟราเรด รูปซ้ายล่างเป็นภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องสี รูปขวาล่างเป็นภาพจากกล้องความลึก ซึ่งให้ค่าระยะลึกของในแต่ละพิกเซลของภาพ และภาพขวาบนเป็นข้อมูลจุดในสามมิติ (point cloud) โดยเป็นการรวมระหว่างข้อมูลระยะลึกและสีจากกล้องสีในพิกเซลนั้น ๆ

4.1.3. แขนหุ่นยนต์ (Katana Robotic Arm)

Katana Robotic Arm [28] เป็นหุ่นยนต์ที่มี 6 องศาเสรี (Degree of Freedom) พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Neuronics AG จากประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้มีขนาดเล็กถึงกลางเหมาะแก่การใช้ในห้องทดลองและงานวิจัย โดยไม่ต้องไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน (Safe Gard แขนหุ่นยนต์มีน้ำหนักรวมเพียง 4.1 กิโลกรัม โดยสามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (Degrees of freedom) ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์กระแสตรงจำนวน 6 ตัว รัศมีการทำงาน 60 เซนติเมตร และมีความผิดพลาดในเชิง ตำแหน่งน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 13 รูปแสดงแขนหุ่นยนต์ (Katana robotic arm)

คุณสมบัติ	Katana 6M180
มอเตอร์	มอเตอร์กระแสตรงพร้อมด้วยมาตรวัดตำแหน่งแบบดิจิทัล
ความแม่นยำ	ผิดพลาดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร
ความสูงฐาน	188 มิลลิเมตร
องศาอิสระ	5 หรือ 6 (ตามจำนวนมอเตอร์)
รัศมีการทำงาน	60 เซนติเมตร
วัสดุ	Anodized Aluminum
น้ำหนัก	4.1 กิโลกรัม
น้ำหนักบรรทุก	500 กรัม
พลังงาน	12 โวลต์ 3.5 แอมแปร์
อัตราเร็ว	เฉลี่ย 90 องศาต่อวินาที

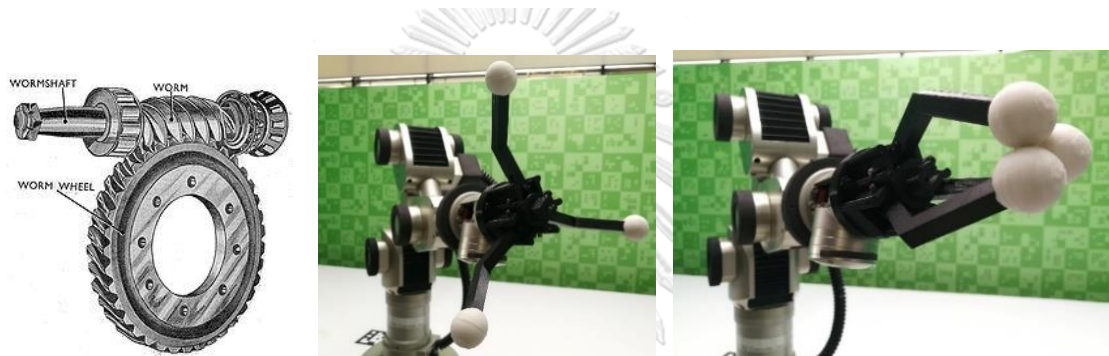
ตารางที่ 1 ตารางคุณสมบัติของหุ่นยนต์ Katana รุ่น 6M180



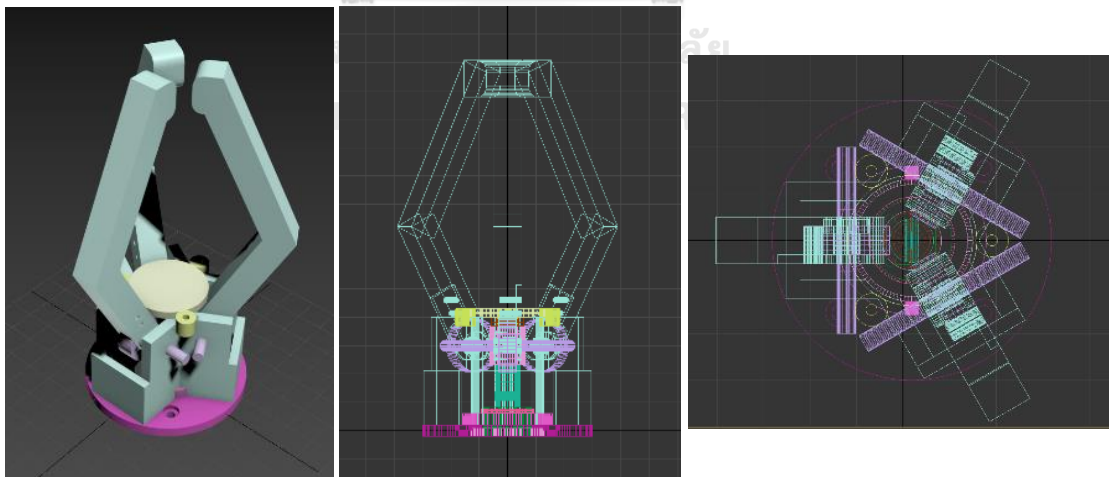
4.1.4. มือจับแบบสามนิ้ว (Three-Finger Gripper)

แขน katana ในส่วนมือจับของหุ่นยนต์ (Gripper) นั้นถูกออกแบบมาเป็นแบบสองนิ้ว ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การหยิบจับวัตถุแบบสามนิ้ว ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการดัดแปลงมือจับของหุ่นยนต์ใหม่ให้เป็นแบบสามนิ้ว โดยรูปแบบนี้ผู้เขียนได้ทำการออกแบบและทำการสร้างขึ้นมาเองด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer)

ในส่วนของข้อต่อขึ้นที่หกของแขน หรือส่วนของมอเตอร์ขับเคลื่อนมือจับ (Gripper) ทำงานด้วยมอเตอร์เพียงตัวเดียว และมอเตอร์มีทิศทางการหมุน ตามแนวแกน Z ของมือจับ หรือก็คือทิศทางพุ่งออกจากมือจับ ผู้วิจัยจึงได้ใช้หลักการของเกียร์ตัวหนอน (Worm Gear) มาขับเคลื่อนนิ้วทั้งสามของมือจับ โดนการเคลื่อนที่ของนิ้วทั้งสามเป็นแบบเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน



รูปที่ 14 รูปแสดง (a) กลไกของเฟืองตัวหนอน (b) มือจับสามนิ้วขณะกางแก (c) มือจับสามนิ้วขณะหุบเข้า



รูปที่ 15 รูปแสดงแบบร่างมือจับแบบสามนิ้ว ด้วยโปรแกรม Autodesk 3dsmax

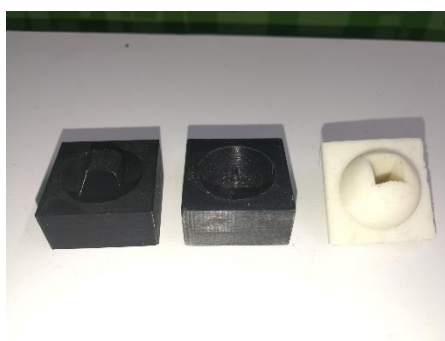
ในส่วนของมือจับที่ทำขึ้นมาใหม่นั้นถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Autodesk 3dsmax โดยให้นิ้วทั้งสามทำมุมคงที่ 120 องศาต่อกัน ชิ้นส่วนของเกียร์หนอนนั้นเป็นชุดเกียร์สำเร็จรูปทำจากโลหะ และส่วนของมือจับสร้างขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer) โดยเครื่องพิมพ์ที่ใช้คือ FLASHFORGE NEW Creator Pro Dual Extrusion รุ่นปี 2017 พิมพ์วัตถุโดยใช้วัสดุพลาสติก PLA (Polylactic acid) ใช้เวลาพิมพ์ทั้งหมด 10 ชั่วโมงโดยประมาณ

ส่วนโครงฐานของมือจับ ได้ทำการเปลี่ยนวัสดุจากการพิมพ์ PLA ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติไปเป็นอลูมิเนียมจากการสั่งทำ เนื่องจากชิ้นส่วนที่ได้จากการพิมพ์นั้นไม่สามารถทนต่อแรงบิดของมอเตอร์เมื่อใช้งานต่อเนื่องไประยะเวลาหนึ่งได้ จึงทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นส่วนตามแนวชั้นของการพิมพ์



รูปที่ 16 รูปแสดง (a) โครงฐานที่หัก (b) โครงฐานที่พิมพ์ซ้ำใหม่ (c) โครงฐานอลูมิเนียม

ปลายนิ้วของมือจับ ทำจากวัสดุยาง (Silicone rubber) โดยผู้วิจัยได้ทำการหล่ออย่างเป็นทรงกลม จากแบบหล่อที่ทำด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อนำมาใส่ที่ปลายนิ้วของมือจับ ที่เป็นทรงกลมเพื่อให้ จุดสัมผัสระหว่างปลายนิ้วกับพื้นผิววัตถุเป็นจุด และที่ใช้วัสดุยางเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างปลายนิ้ว กับพื้นผิววัตถุ



รูปที่ 17 รูปแสดงเบ้าหล่อซิลิโคน สำหรับปลายนิ้ว ที่ทำจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

4.1.5. เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer)

เครื่องที่ใช้คือ FLASHFORGE New Creator Pro Dual Extrusion รุ่นปี 2017 พิมพ์วัสดุโดยใช้วัสดุพลาสติก (Polylactic acid) โดยรูปแบบที่นำมาใช้พิมพ์เพื่อทดลองเป็นรูปแบบเดียวกันกับหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติคือ หลอมละลายเส้นพลาสติกที่หัวพิมพ์แล้วทำการวาดเป็น 2 มิติ วาดขึ้นในแนวตั้งเป็นชั้น ๆ จนเป็นชิ้นงาน 3 มิติ ข้อดีของการทำงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติคือ ง่าย ใช้เวลาไม่มาก วัสดุพลาสติกเบา แข็งแรง ความแม่นยำ แต่ก็มีข้อเสียคือ การขึ้นรูปชิ้นงานเกิดจากการพิมพ์ซ้อนกันเป็นชั้น ๆ ทำให้ความสามารถในการรับแรงในทิศทางตั้งฉากกับชั้นพิมพ์มีน้อยกว่าทิศทางอื่น จึงต้องระมัดระวังในการออกแบบวัตถุที่จะทำการพิมพ์

แต่ด้วยความง่ายในการพิมพ์ เวลาในการพิมพ์ที่ไม่มากและต้นทุนวัตถุดิบที่ราคาถูก ทำให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานที่ซารุดขึ้นมาได้ใหม่เรื่อย ๆ ซึ่งเป็นข้อดีอย่างมากของการใช้เครื่องพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 18 รูปแสดง (a) เครื่องพิมพ์สามมิติ (b) ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2. การทดลอง

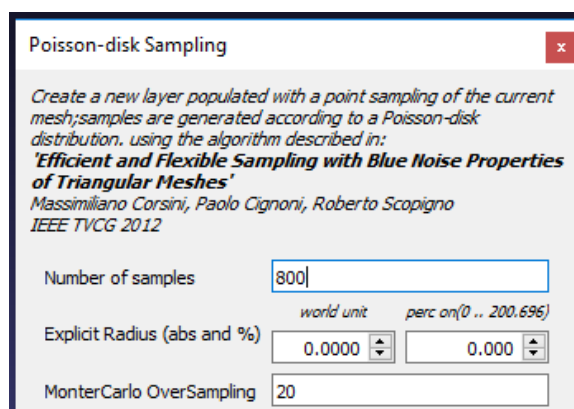
ในส่วนของการทดลองนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการทดลองจากข้อมูลนำเข้า ซึ่งได้จากการดาวโหลดจาก Kit object database สแกนวัตถุด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนความละเอียดสูงเพื่อให้เห็นถึงลักษณะของกระบวนการวิธีหระนาบการหีบจับ และส่วนที่สองคือการสแกนวัตถุด้วย Kinect v2 ซึ่งจะให้ความละเอียดและแม่นยำที่น้อยกว่า รวมถึงการสแกนวัตถุด้วยวิธีนี้จึงใจให้ได้ข้อมูลที่หายิบเพื่อต้องการแสดงถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีหระนาบการหีบจับที่สามารถทนทานต่อข้อมูลนำเข้าแบบหายิบได้ เพื่อจำลองสถานการณ์ในโลกจริง ที่ต้องการกระบวนการที่รวดเร็ว แต่เต็มไปด้วยความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์เซนเซอร์

4.2.1. การทดลองจากข้อมูลนำเข้าจาก Kit object database

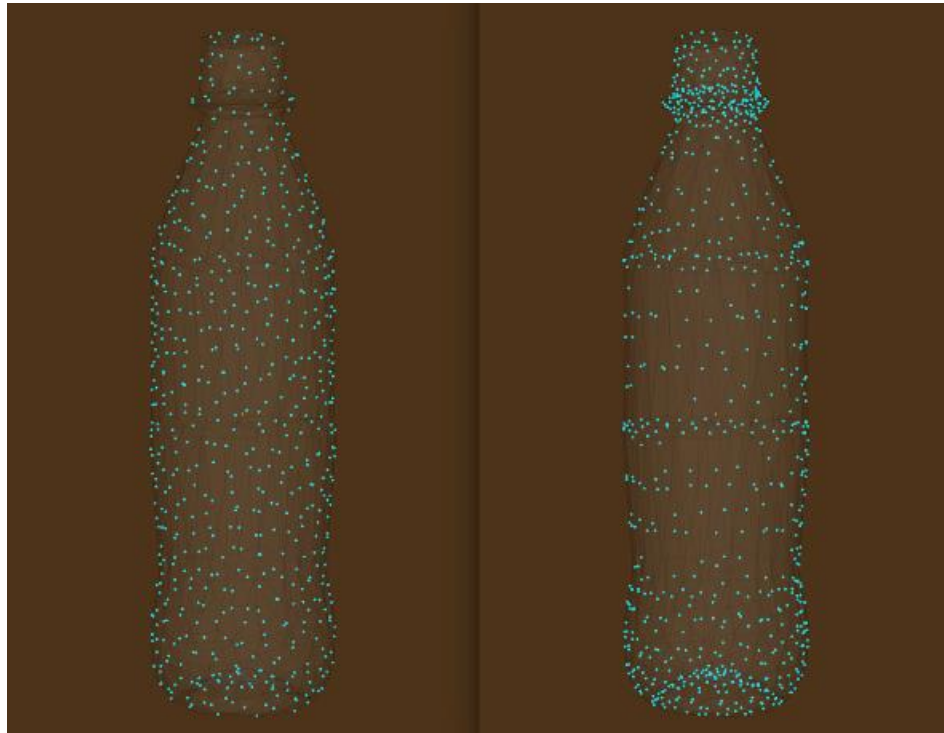
การทดลองทั้งหมดทำงานบนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) รุ่น Intel® Core™ i7-3770 ความเร็ว 3.40 Ghz และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) ขนาด 32GB โดยใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu 14.04 สถาปัตยกรรม 64 บิต ผ่านระบบ Virtual machine ยี่ห้อ Oracle VM VirtualBox ซึ่งใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Window 10 โปรแกรมในส่วนนี้ถูกเขียนด้วยภาษา Python และใช้ The Visualization Toolkit Library ในการแสดงผลสามมิติ

ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองหาระนาบการหยิบจับ (Grasping plane) ซึ่งผลลัพธ์จะถูกนำเสนอในรูปแบบของทรงกลมของระนาบการหยิบจับ (Grasping sphere) ตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นผิวทรงกลมแสดงถึง normal vector ของแต่ละระนาบการหยิบจับ โดยใช้ข้อมูลนำเข้าเป็นข้อมูลวัตถุที่ download มาจาก KIT object database วัตถุที่นำมาใช้มี 8 ชนิดด้วยกันคือ CokePlasticSmallGrasp, Dog, Fish, CatLying, Dwarf, Heart, LetterP และ Cube ซึ่งเป็นวัตถุที่อยู่ในหมวดหมู่ของ grasping ใน KIT object database โดยมีความละเอียดอยู่ที่ประมาณ 800 face ต่อ 1 วัตถุ

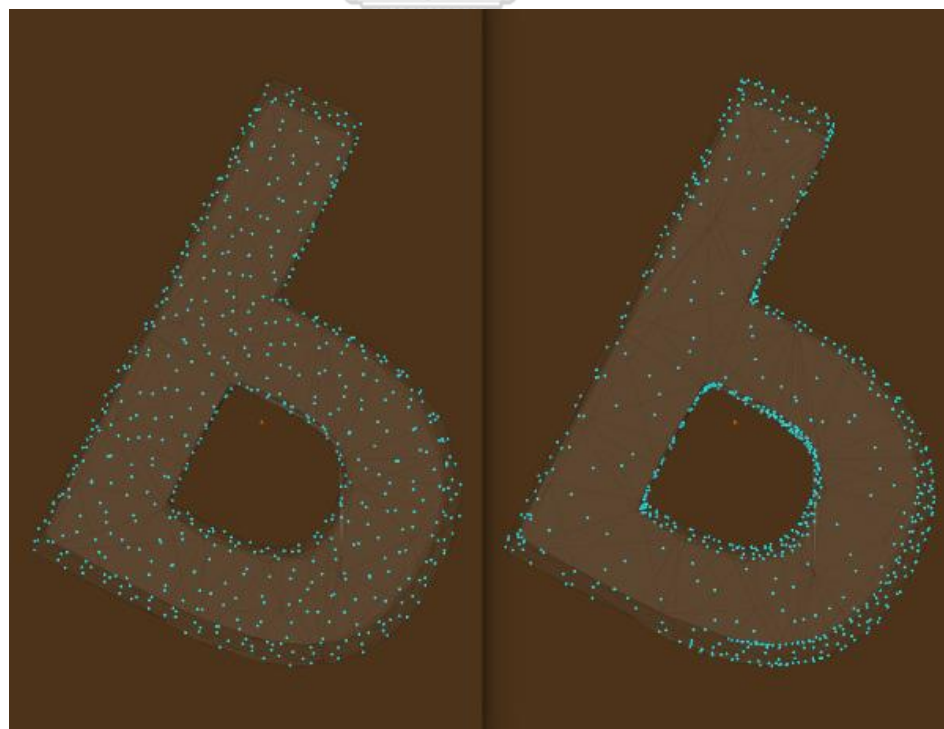
ข้อมูลที่นำมาใช้ จะอยู่ในรูปแบบของ file นามสกุล obj ซึ่งให้ข้อมูลของวัตถุเป็น ตำแหน่งพิกัด x y z บนพื้นผิวของวัตถุ และ id ของแต่ละจุดที่ประกอบกันเป็นแต่ละ 1 facet ในการวิเคราะห์การหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์โดยทั่วไปนั้นมักใช้จุดศูนย์กลางของ facet เป็นจุดสัมผัสระหว่างหุ่นยนต์กับวัตถุ และใช้ทิศทางที่ตั้งฉากกับ facet นั้น ๆ แทนทิศทางที่นิ้วหุ่นยนต์สามารถออกแรงต่อผิวสัมผัสวัตถุ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ได้ แต่การทำแบบนี้จะส่งผลให้การวิเคราะห์ระนาบการหยิบจับได้ผลไม่ดี เพราะขนาดของ facet ในแต่ละอันมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้อัตราส่วนความหนาแน่นของจุดสัมผัสต่อพื้นที่ผิววัตถุมีปริมาณไม่คงที่ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องนี้จึงใช้วิธีการของ Blue noise property [29] เพื่อสร้างจุดที่กระจายตัวคงที่ (Uniform sampling) แบบ Poisson distribution โดยการสร้างการกระจายตัวนี้สามารถทำได้ด้วยโปรแกรม MeshLab ในเมนู Filter -> Sampling -> Poisson-disk Sampling โดยจะนวน sampling ตั้งค่าไว้ที่ 800 ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 รูปแสดงค่าพารามิเตอร์ Poisson-disk Sampling

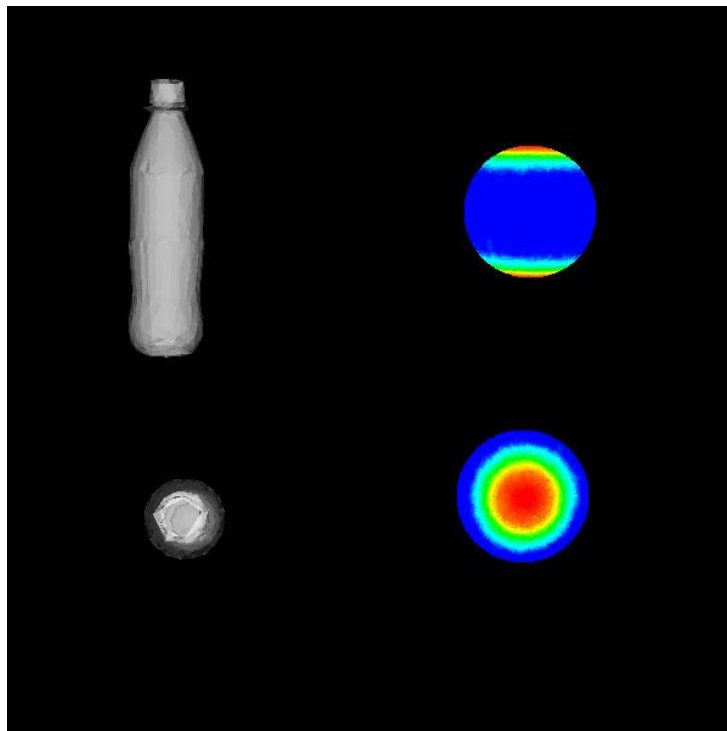


รูปที่ 20 รูปแสดง (a) Poisson-disk Sampling (b) ก่อนใช้ Poisson-disk Sampling ของ CokePlasticSmallGrasp

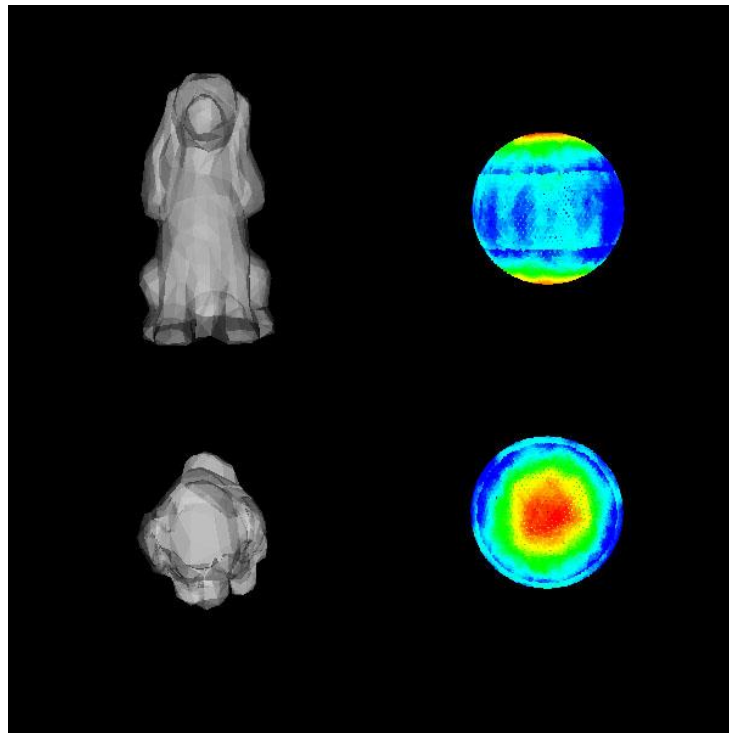


รูปที่ 21 รูปแสดง (a) Poisson-disk Sampling (b) ก่อนใช้ Poisson-disk Sampling ของ LetterP

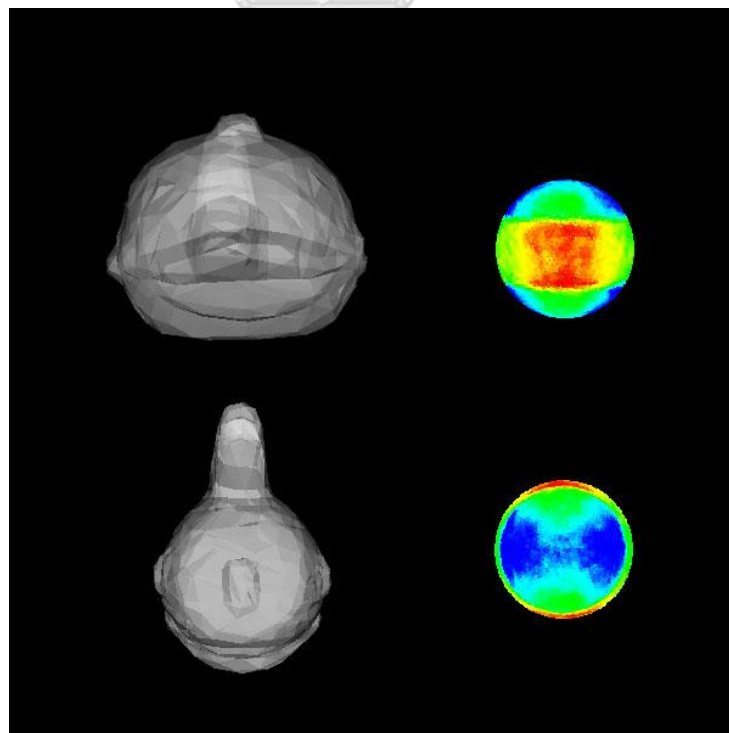
จำนวนระนาบที่นำมาใช้หาระนาบการหยิบจับ อยู่ที่ 8000 ระนาบ (ขนาดของ array C ในรหัสเทียมรูปที่ 8) โดยจำนวนระนาบจะส่งผลต่อความละเอียดของแผนภูมิความร้อนทรงกลม (Heatmap Grasping sphere) และความเร็วในการคำนวณ คะแนนของแต่ละระนาบการหยิบจับจะใช้ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกรวยจะถูกตั้งค่าที่ 50 องศา จุดแต่ละจุดของแผนภูมิความร้อนทรงกลมแสดง normal vector ของแต่ละระนาบการหยิบจับ และสีแสดงถึงคะแนนของแต่ละระนาบโดยสีแดงหมายถึงคะแนนที่ดีและสีน้ำเงินหมายถึงคะแนนที่ไม่ดี



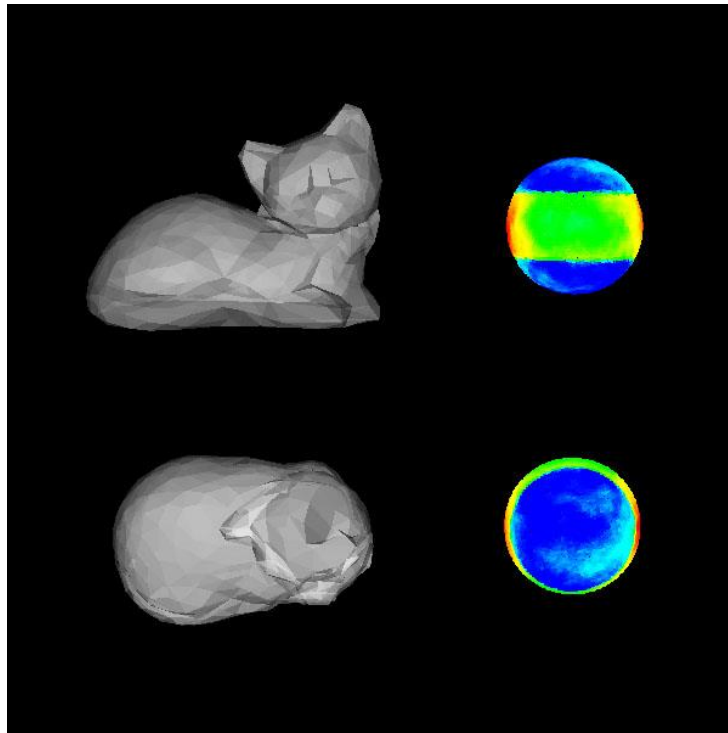
รูปที่ 22 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CokePlasticSmallGrasp



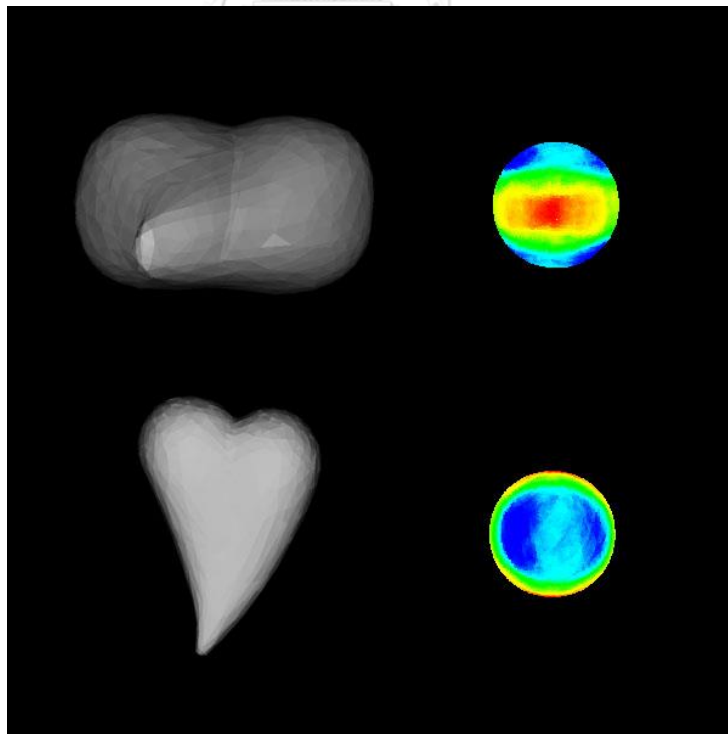
รูปที่ 23 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Dog



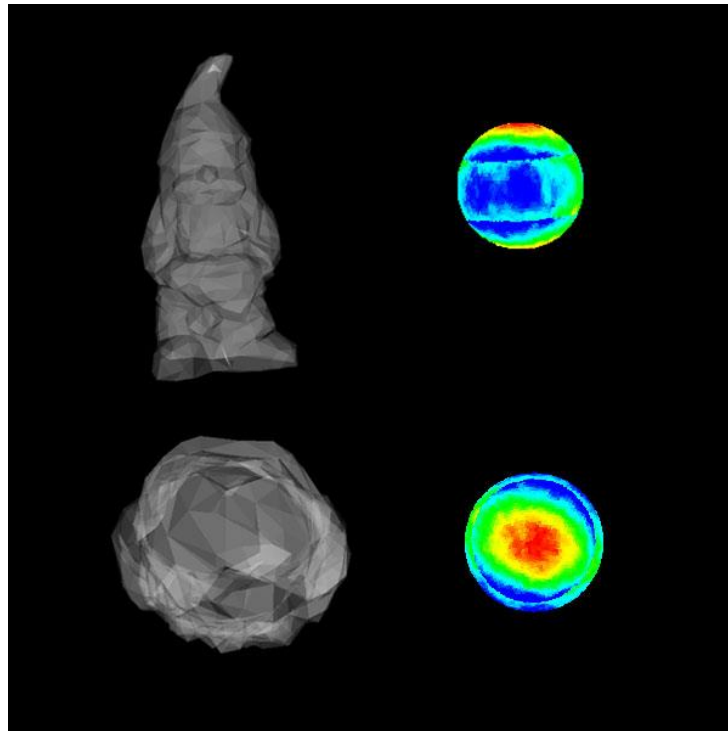
รูปที่ 24 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Fish



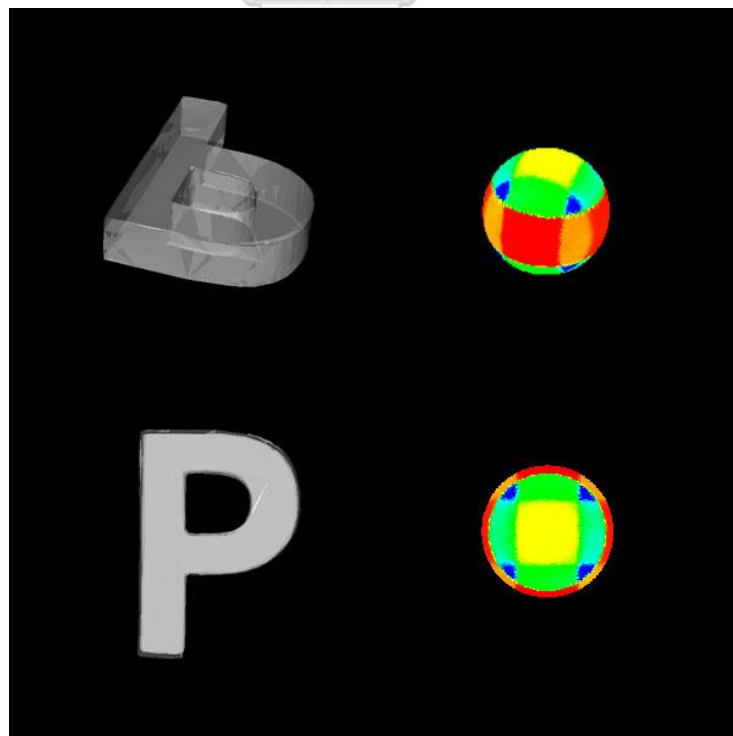
รูปที่ 25 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CatLying



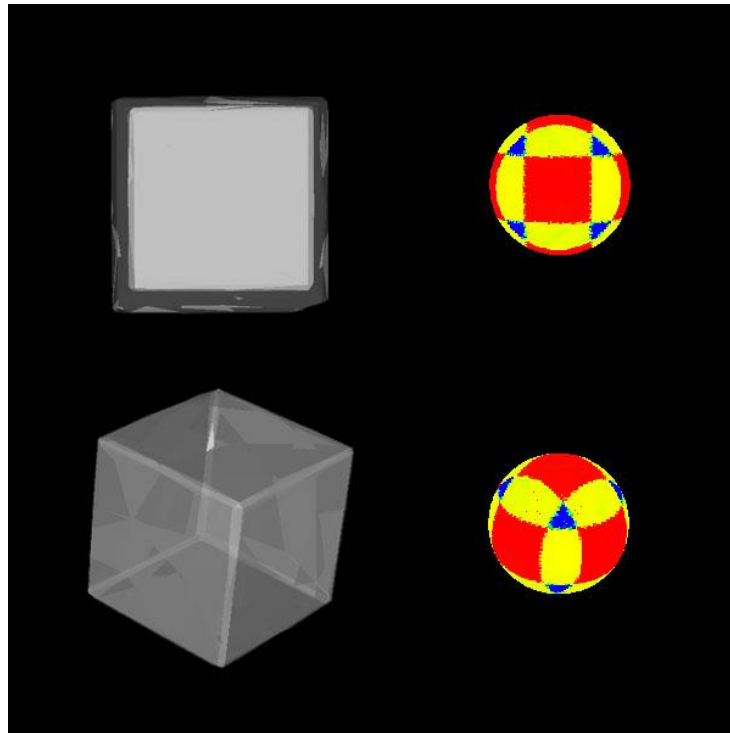
รูปที่ 26 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Heart



รูปที่ 27 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Dwarf



รูปที่ 28 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ LetterP



รูปที่ 29 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Cube

เมื่อพิจารณาจากผลลัพธ์ที่ได้

CokePlasticSmallGrasp มีระนาบที่มีคะแนนสูงอยู่ที่บริเวณตัดแนวขวางของขวด หรือทิศทางของระนาบในด้านบน และด้านล่าง ซึ่งจาก grasping sphere นี้ได้แนะนำให้มีหุ่นยนต์หยิบวัตถุจากทิศทางด้านบนของขวดและจากด้านล่างของขวด ซึ่งจะให้โอกาสสำเร็จในการหยิบวัตถุมากกว่าในทิศทางอื่น ๆ

Dog มีระนาบที่มีคะแนนที่ระดับกลางกระจายอยู่ทั่วไป แต่ระดับคะแนนที่ดีส่วนใหญ่จะอยู่ที่ทิศทางด้านบน และด้านล่าง

Fish มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางด้านหน้า และทางด้านหลัง (ส่วนหาง) ในทิศทางด้านบนและด้านล่างของปลานั้นมีคะแนนที่น้อย เนื่องจากหางปลามีลักษณะยาวยื่นออกมาจากตัวปลาทำให้การวางนิ้วไปที่ตำแหน่งหางปลาทำได้ยาก

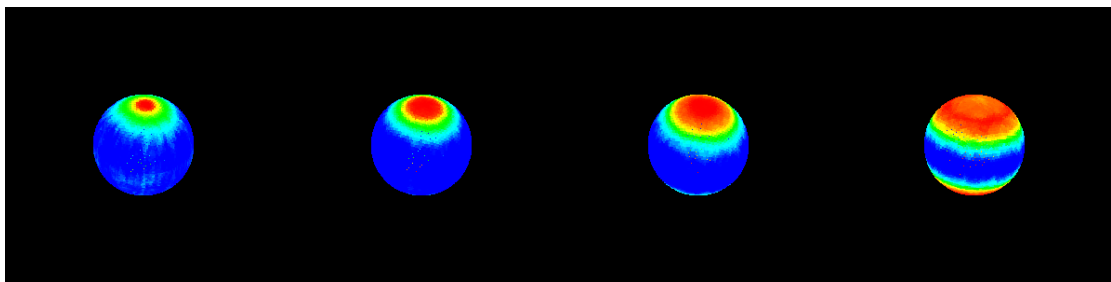
CatLying มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางด้านข้างซ้าย และด้านข้างขวา ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับ Fish เพราะมีลักษณะเป็นแนวยาวคล้าย ๆ กัน

Heart มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางด้านปลายแหลม และด้านที่เป็นส่วนเว้า การจับจากด้านบนและจากด้านล่างมีคะแนนที่น้อยกว่าเพราะวัตถุมีลักษณะแบน

Dwarf มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางด้านบนและจากด้านล่าง ซึ่งคล้ายๆกับ Dog

LetterP มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางเข้าตามขอบรอบนอก เพราะวัตถุมีลักษณะเป็นทรงแบบผลัฟร์จึงคล้ายคลึงกับ Heart

Cube มีระนาบที่มีคะแนนที่ดีอยู่ที่ทิศทางด้านทั้งหก และมีคะแนนที่แย่มากเมื่อเขาจับในทิศทางด้านมุมของกล่อง ซึ่งสมเหตุสมผลกับความเป็นจริงเพราะการใช้นิ้วสามนิ้วหยิบ Cube จากด้านมุมนั้นทำได้ยากแล้วนิ้วต้องมีแรงเสียดทานที่มาก



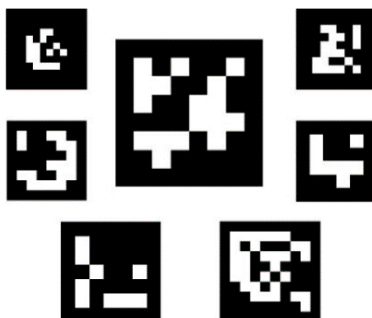
รูปที่ 30 รูปแสดงแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ CokePlasticSmallGrasp ที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่าง ๆ

ตัวแปรที่ส่งผลอย่างมากต่อคะแนนของระนาบการหยิบจับคือค่าครึ่งมุมของกรวยแรงเสียดทาน (Half friction cone degree) ในรูปแสดงลักษณะของ Grasping sphere ที่เปลี่ยนไปตาม มุม 10, 15, 20 และ 25 โดยเรียงจากซ้ายไปขวา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สัมพันธ์กับความเป็นจริงเพราะเมื่อนิ้วมือของหุ่นยนต์หรือผิวสัมผัสวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่มากขึ้น หุ่นยนต์ย่อมสามารถทนทานต่อแรงภายนอกได้มากขึ้น ทำให้ระนาบการหยิบจับในทิศทางอื่น ๆ มีการกระจายคะแนนที่ดีขึ้น

4.2.2 การทดลองจากข้อมูลนำเข้าที่สแกนด้วย Kinect V2

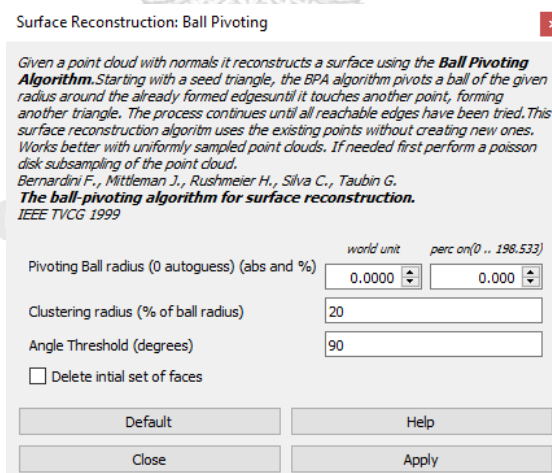
การทดลองทั้งหมดทำงานบนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) รุ่น Intel® Core™ i7-3770 ความเร็ว 3.40 Ghz และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) ขนาด 32GB โดยใช้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Window 10 สถาปัตยกรรม 64 บิต ซึ่งใช้งานบนระบบปฏิบัติการ โปรแกรมในส่วนนี้ถูกเขียนด้วยภาษา C++ และใช้ [30] libfreenect2pclgrabber เพื่อเชื่อมต่อ Kinect v2 สองเครื่องพร้อมกัน

โดย Kinect ทั้ง 2 เครื่องจะถูกติดตั้งที่ตำแหน่งหันหน้าเข้าหากันดังรูปที่ 33 เพื่อให้สามารถสแกนข้อมูลวัตถุพร้อมกันทั้งด้านหน้าและด้านหลัง โดย ตำแหน่งของ Kinect ทั้งสองจะถูกคำนวณ Transformation matrix ด้วย แผ่นสัญลักษณ์ ArUco ที่ติดตั้งอยู่บนโต๊ะ ด้วยขั้นตอนวิธีของ [31] ผ่าน library ของ OpenCV [32]



รูปที่ 31 รูปแสดงตัวอย่าง ArUco marker

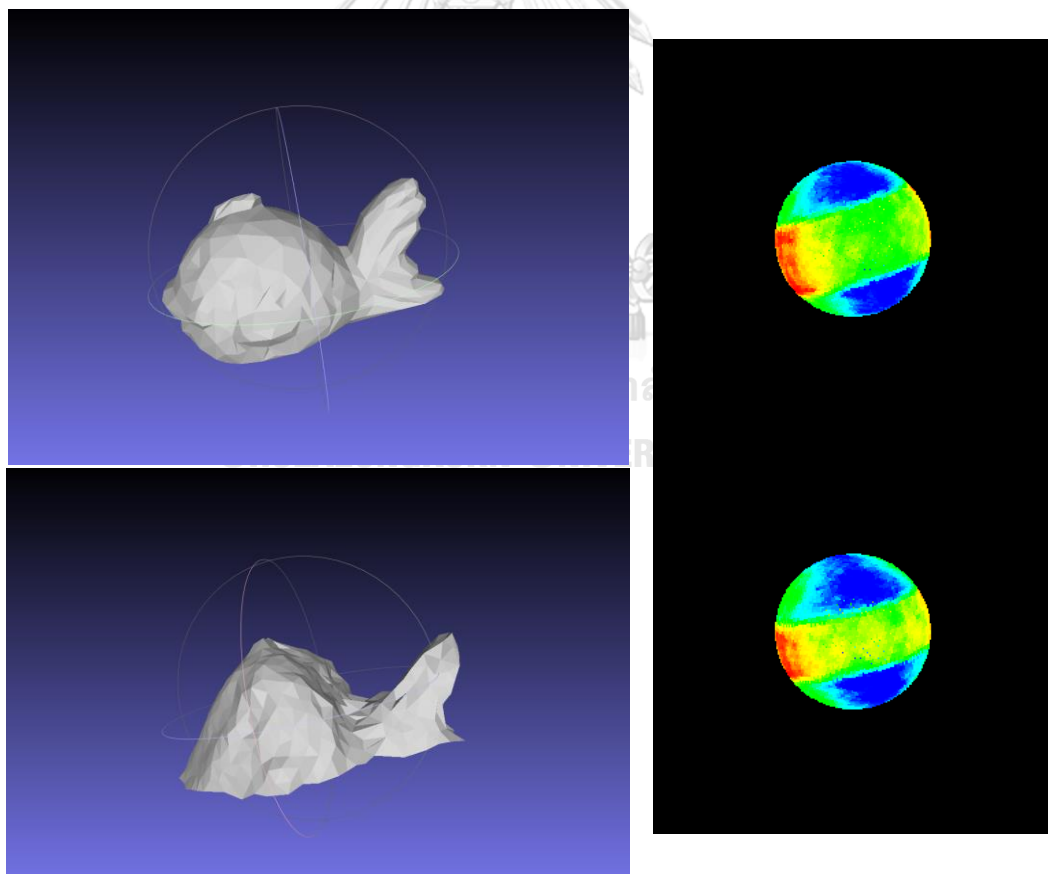
ข้อมูลที่ได้จาก Kinect จะเป็นข้อมูลจุดของวัตถุในปริภูมิสามมิติ (point cloud) ซึ่งมีความละเอียดของจำนวนจุดปริมาณมาก เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จาก KIT จึงต้องทำการลดความละเอียดของข้อมูลให้มีความละเอียดใกล้เคียงกัน โดยใช้วิธีการของ Blue noise property [29] ด้วยโปรแกรม MeshLab แบบ Poisson distribution ในเมนู Filter -> Sampling -> Poisson-disk Sampling จากนั้นข้อมูลจะถูก reconstruction เพื่อให้ได้ mesh model ที่มีความละเอียดประมาณ 800 faces โดยวิธีการของ ball-pivoting [33] ด้วยโปรแกรม MeshLab ในเมนู Filter -> Reconstruction -> Surface Reconstruction : ball-pivoting โดยมีกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 รูปแสดงค่าพารามิเตอร์ใน Surface Reconstruction : ball-pivoting



รูปที่ 33 รูปแสดงตำแหน่งติดตั้ง Kinect เครื่องที่ 1, 2 และสัญลักษณ์ ArUco ที่พื้นโต๊ะ



รูปที่ 34 รูปเปรียบเทียบแผนภูมิความร้อนทรงกลม ของ Fish (รูปแถวบน) KIT 800 faces (รูปแถวล่าง) ข้อมูล จาก Kinect 800 faces

จากรูปที่ 34 จะเห็นได้ชัดว่าแผนภูมิความร้อนทรงกลมของ Fish ทั้งข้อมูลจาก KIT และข้อมูลที่สแกนจาก Kinect ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน คะแนนระนาบการหยิบจับอยู่ที่ทิศทางด้านบนและล่างของ Fish ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าการสแกนข้อมูลนำเข้าแบบหยาบๆก็ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันจากวิธีการของระนาบการหยิบจับ

4.3. การทดลองบนหุ่นยนต์จริง

เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระนาบการหยิบจับ การทดลองจึงทำบนหุ่นยนต์จริงโดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองได้ทำการพิมพ์ขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ จากข้อมูลนำเข้า KIT ซึ่งเป็นข้อมูลเดียวกันกับ ข้อ 4.2.1

4.3.1. วัตถุที่ใช้ทดสอบ

วัตถุที่ใช้ในการทดลองจะถูกพิมพ์ขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ด้วยวัสดุพลาสติกชนิด PLA สีดำโดยให้ขนาดของวัตถุมีด้านที่กว้างที่สุดไม่เกิน 12 เซนติเมตรโดยประมาณ โดยมี 4 ชนิดคือ CokePLasticSmallGrasp, Dog, Fish และ CatLying



รูปที่ 35 รูปแสดงวัตถุที่ใช้ในการทดลอง จากการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ

4.3.2. สภาพแวดล้อมในการทดลอง

การทดลองทั้งหมดจะเกิดขึ้นบน โต๊ะระนาบ ที่ใช้วัสดุปิดผิวลามิเนตสีขาวด้าน โดยมีแขนหุ่นยนต์ (Katana Robotic Arm) ถูกยึดติดอยู่บนระนาบโต๊ะด้วยสกรู วัตถุจะถูกวางบนแท่นสำหรับวางวัตถุที่พิมพ์ขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติโดยวัตถุและแท่นวางถูกยึดติดกันด้วยดินน้ำมันดังรูปที่ 36(b)



รูปที่ 36 รูปแสดง (a) สภาพแวดล้อมในการทดลอง (b) แท่นวางวัตถุทดลอง

เนื่องด้วยการเคลื่อนที่ ๆ จำกัดของหุ่นยนต์ ในการทดลองหุ่นยนต์จึงถูกโปรแกรมให้เคลื่อนมือไปที่วัตถุในแนวตั้ง โดยให้ระยะของนิ้วมือหุ่นยนต์เมื่อทำการบีบมือจับอยู่ที่จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ แล้วให้มือของหุ่นยนต์จับวัตถุแล้วยกขึ้นมอดังรูปที่ 37 ที่ปลายนิ้วของหุ่นยนต์ไม่ได้ถูกติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการสัมผัส (Tactile sensor) ดังนั้นมือหุ่นยนต์จะทำการบีบวัตถุไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงค่าพารามิเตอร์จำกัดของมอเตอร์ที่ได้ตั้งค่าไว้เพื่อไม่ให้มือของหุ่นยนต์ หรือวัตถุที่ใช้ทดลองได้รับความเสียหาย โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะประกอบด้วย ยกมือของหุ่นยนต์มาที่ตำแหน่งตั้งต้นแล้ววางมือจับออก เคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งของวัตถุ, ใช้มือจับบีบไปที่วัตถุ, เคลื่อนมือพร้อมวัตถุไปยังตำแหน่งสุดท้าย, หยุดนิ่ง 2 สองวินาที ตามแผนภูมิขั้นตอนตารางที่ 2

แท่นวางวัตถุนั้นมีฐานที่ถูกยึดติดไปกับโต๊ะด้วยกาว และส่วนปลายของแท่นวางที่สัมผัสกับวัตถุถูกออกแบบมาให้เป็นแบบแท่งยาวขนาดเล็ก เพื่อให้แรงภายนอกที่กระทำต่อวัตถุทดลอง เช่นแรงที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างพื้นโต๊ะกับผิววัตถุนั้นมีน้อยที่สุด วัตถุกับปลายแท่นวางจะถูกยึดติดกันด้วยดินน้ำมัน ดินน้ำมันมีคุณสมบัติยึดติดที่เพียงพอที่จะทำให้วัตถุและแท่นวางยึดติดกันโดยไม่เกิดการเคลื่อนที่ และสามารถแกะออกแล้วเปลี่ยนตำแหน่งการยึดติดกันได้โดยง่าย เพื่อให้จัดวางวัตถุในทิศทางต่างสำหรับการทดลอง

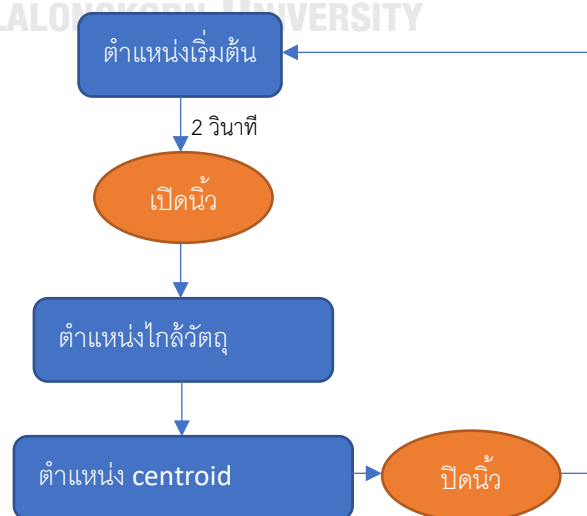
ในการทดลองจะทำโดย สุ่มวางวัตถุในทิศทางต่าง ๆ ของระนาบการหยิบจับ (Grasping plane) โดยระนาบที่มีคะแนนสูงจะแสดงด้วยสีแดง และระนาบที่คะแนนไม่ดีจะแสดงสีน้ำเงิน โดยวัตถุส่วนใหญ่จะมีระนาบที่มีคะแนนสูงเป็นส่วนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับระนาบทั้งหมด ดังนั้นการทดลองจะทำการสุ่มหยิบไปที่ระนาบที่มีคะแนนสูง 10 ครั้งแล้วบันทึกจำนวนครั้งที่หุ่นยนต์หยิบวัตถุสำเร็จ ส่วนระนาบที่มีคะแนนน้อยจะถูกสุ่มหยิบเป็นจำนวน 30 ครั้งเพื่อให้ครอบคลุมระนาบในหลายๆด้านทั่ววัตถุทดลอง แล้วบันทึกจำนวนครั้งที่หุ่นยนต์หยิบวัตถุสำเร็จ

การหยิบวัตถุของหุ่นยนต์ที่บันทึกว่าสำเร็จ คือหุ่นยนต์จะต้องจับวัตถุแล้วยกขึ้นมาได้ โดยในระหว่างที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่ยกวัตถุขึ้น วัตถุจะต้องหยุดอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับมือของหุ่นยนต์ ไม่สั่นหรือไถลหลุดไปจากนิ้วหุ่นยนต์ และเมื่อหุ่นยนต์ยกวัตถุมาถึงระดับความสูงที่กำหนดไว้วัตถุยังคงต้องอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับมือหุ่นยนต์อย่างน้อยสองวินาที



รูปที่ 37 รูปแสดงขั้นตอนการทดสอบหยิบจับวัตถุ 1 ครั้ง

CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ 2 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลองหยิบวัตถุของหุ่นยนต์

Real Grasping Test		
Object	Plane	success rate
CokePlasticSmallGrasp	Top	10/10
	Bottom	10/10
	Low score	3/30 (10%)
Dog	Top	9/10
	Bottom	10/10
	Low score	4/30 (13%)
Fish	Face	8/10
	Tail	6/10
	Low score	5/30 (17%)
CatLying	Left	9/10
	Right	7/10
	Low score	4/30 (13%)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลการทดลองบนหุ่นยนต์จริง

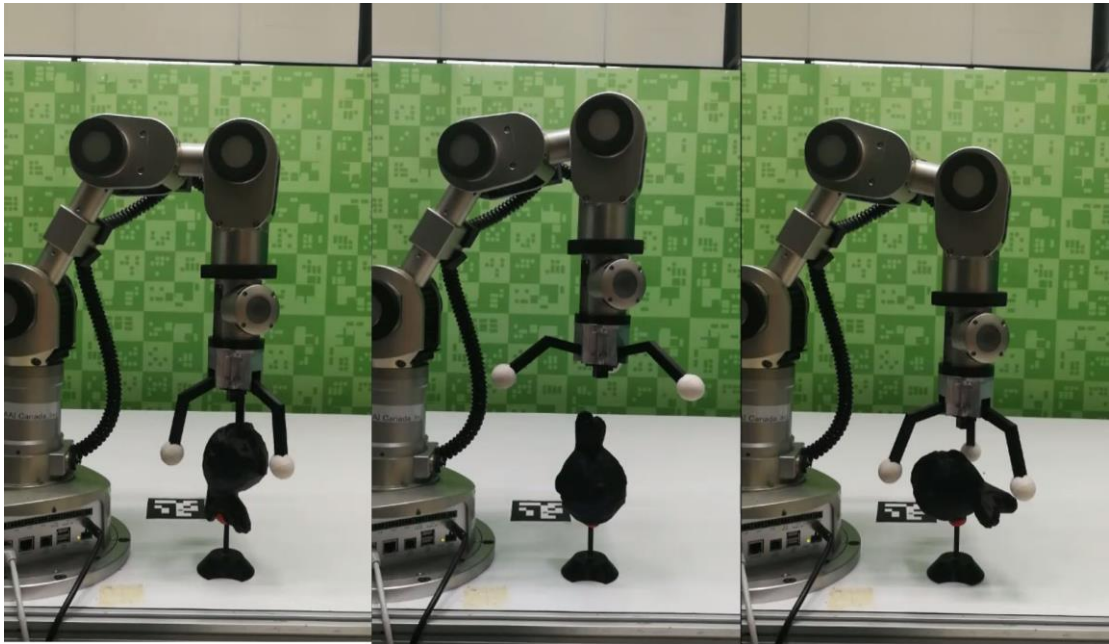
จากผลการทดลองจะเห็นว่าโอกาสสำเร็จในการหยิบวัตถุทั้ง 4 แบบในทิศทางที่มีคะแนนที่ดีนั้นให้อัตราความสำเร็จมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และการหยิบวัตถุในทิศทางอื่น ๆ ที่คะแนนน้อยกว่าให้อัตราสำเร็จเพียงแค่ประมาณ 13 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับคะแนนของทรงกลมของระนาบการหยิบจับ นั้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีระนาบการหยิบจับที่วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ

สาเหตุสำคัญที่ทำให้การหยิบจับวัตถุนั้นล้มเหลวแบ่งออกได้เป็นสองกรณีคือ มือนั้นสามารถหยิบวัตถุขึ้นมาได้แต่วัตถุจะหลุดหล่นออกจากมือในภายหลัง และหุ่นยนต์นั้นไม่สามารถหยิบวัตถุขึ้นมาได้ สำหรับกรณีแรกในการหยิบวัตถุในทิศทางของระนาบการหยิบจับที่มีคะแนนน้อยหุ่นยนต์ยังคงสามารถหยิบวัตถุขึ้นมาได้เนื่องด้วยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีมากพอแต่ทำจับนั้นไม่ได้มีคุณสมบัติปิดของแรงทำให้เมื่อยกวัตถุขึ้นวัตถุสามารถเกิดแรงทางพลศาสตร์ขึ้นได้ทำให้แรงที่นิ้วกระทำต่อวัตถุไม่สามารถทนทานได้ วัตถุจึงลื่นหลุดออกจากมือในภายหลัง สำหรับในกรณีหลังที่หุ่นยนต์ไม่สามารถหยิบวัตถุขึ้นมาได้ เนื่องจากมือของหุ่นยนต์เป็นมือจับแบบเคลื่อนที่เชิงมุม (angular gripper) และนั่นทั้งสามนิ้วมีการเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กัน เมื่อทำการหยิบวัตถุที่มีลักษณะยาว เช่น การหยิบจับขวดจากทิศทางข้างขวดทำให้มีนิ้วบางนิ้วสัมผัสกับวัตถุก่อนนิ้วอื่น ทำให้นิ้วนั้นมีโอกาสตัดวัตถุเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเริ่มต้นจนทำให้นิ้วอื่น ๆ ไม่สามารถจับวัตถุได้

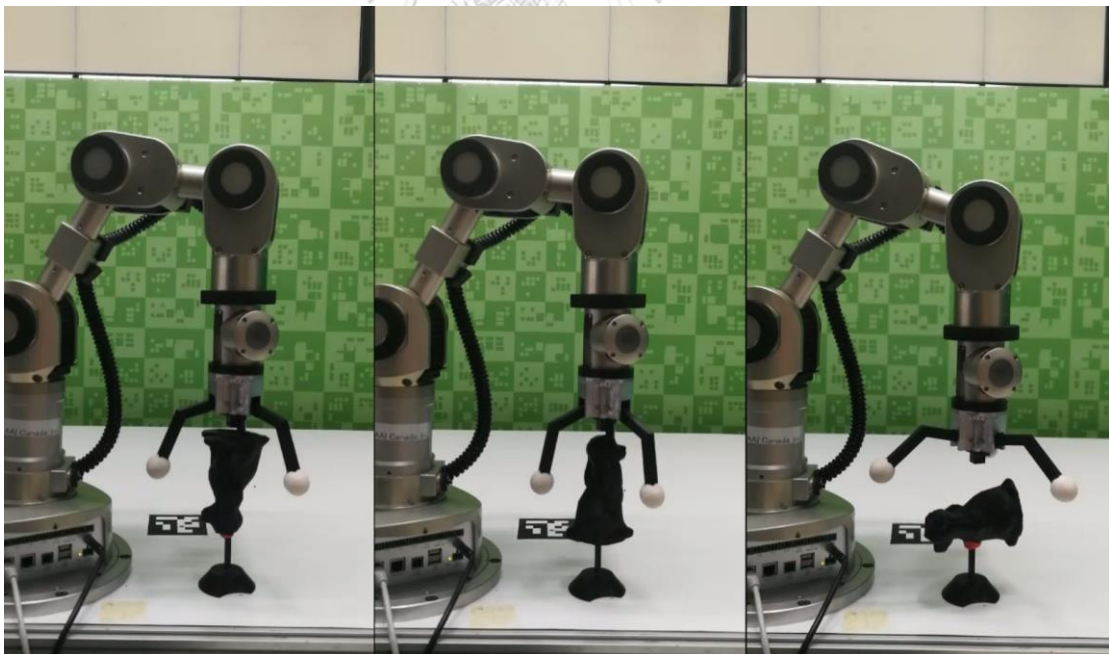
อย่างไรก็ตามแม้ว่าหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองจะมีข้อจำกัด แต่ผลลัพธ์ที่ได้ก็ยังคงสอดคล้องกับขั้นตอนวิธีที่นำเสนอทำให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีระนาบการหยิบจับยังสามารถทนทานต่อข้อจำกัดนี้ได้ สำหรับผลการทดลองในรูปแบบวิดีโอสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ <https://goo.gl/4ZmdK5>



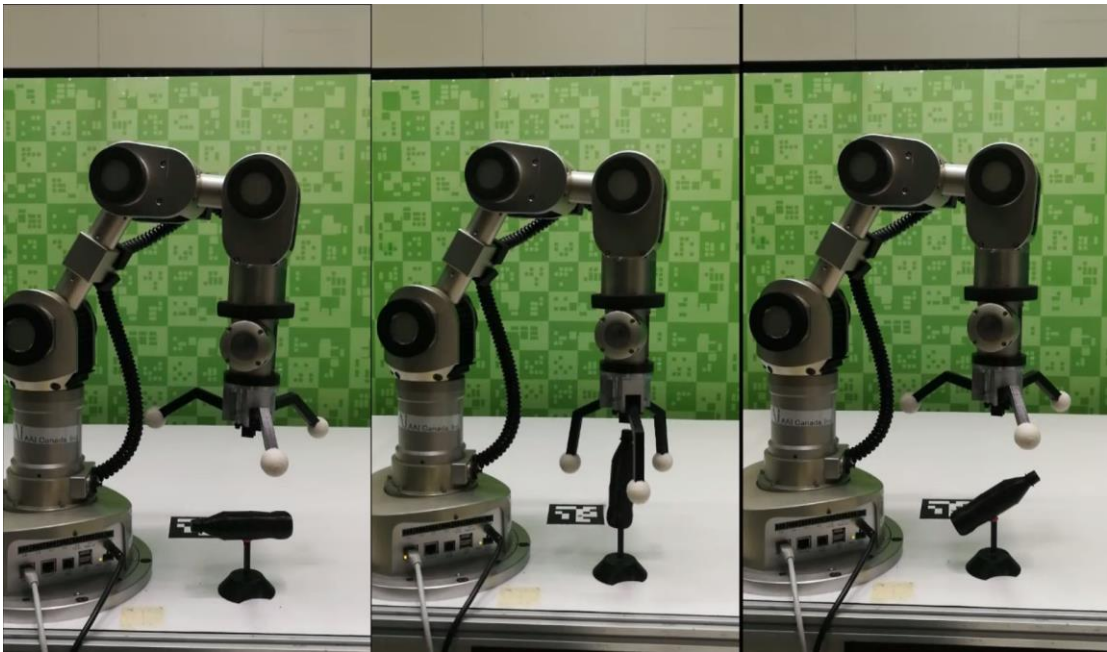
รูปที่ 38 รูปแสดงการทดลองหยิบวัตถุที่นับว่าไม่สำเร็จ



รูปที่ 39 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ Fish



รูปที่ 40 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ Dog



รูปที่ 41 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ CokePlasticSmallGrasp



รูปที่ 42 รูปแสดงตัวอย่างการทดลองจับวัตถุ CatLying

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและแนวทางการวิจัยในชั้นต่อไป

5.1. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนมากมุ่งเน้นไปที่การเสนอวิธีการที่ทนทานต่อความคลาดเคลื่อนของระบบเพื่อช่วยให้โอกาสสำเร็จในการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์มีมากขึ้น ทั้งขั้นตอนวิธีแบบ ICR [8-11] และ Caging [12-16] แต่ส่วนใหญ่ยังคงใช้ขั้นตอนวิธีการแบบแยกคิดทีละนิ้ว ซึ่งความคลาดเคลื่อนของนิ้วหนึ่ง ๆ สามารถส่งผลกระทบต่อนิ้วอื่น ๆ รวมถึงงานวิจัยในช่วงหลังที่นิยมใช้นิ้วหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นยางยืดหยุ่นที่สร้างแรงเสียดทานได้มาก ๆ ซึ่งในการจับอาศัยข้อดีของแรงเสียดทานแต่ไม่ได้มีทฤษฎีที่มารองรับจึงเป็นไปได้ยากในการวางแผนการหยิบจับ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีหาระนาบการหยิบจับวัตถุสำหรับมือหุ่นยนต์แบบสามนิ้ว ซึ่งตั้งอยู่บนหลักทฤษฎีของการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์แบบสามนิ้วโดยมีคุณสมบัติปิดของแรง โดยมองการวางแผนการหยิบจับวัตถุจากการระบุตำแหน่งการหยิบจับ เป็นการระบุระนาบในการหยิบจับ ซึ่งรับประกันกว่าถ้าหุ่นยนต์วางนิ้วไปที่ระนาบการหยิบจับนี้จะให้โอกาสสำเร็จในการหยิบจับวัตถุที่ดี และมีคุณสมบัติปิดของแรง ซึ่งขั้นตอนวิธีหาทำได้ง่ายไม่ซับซ้อนและใช้เวลาคำนวณที่สั้น แต่ให้ผลลัพธ์ที่ดีซึ่งได้แสดงผลทดสอบให้ดูบนการทดลองกับหุ่นยนต์จริง ขั้นตอนวิธีที่ได้นำเสนอตั้งอยู่บนพื้นฐานทฤษฎีของการหยิบจับวัตถุของหุ่นยนต์ ซึ่งคาดหวังว่าจะสามารถนำไปใช้งานต่อยอดได้ดีกว่า กระบวนการเชิงประจักษ์ที่ต้องอาศัยการทดลองเรียนรู้จากวัตถุ

ระนาบการหยิบจับนั้นมีประโยชน์อย่างมากต่อการวางแผนการหยิบจับวัตถุ ไม่เพียงแต่ขั้นตอนการระบุตำแหน่งการวางนิ้วของหุ่นยนต์ แต่มีผลดีไปถึงการวางแผนการเคลื่อนที่เข้าหาวัตถุ เพราะบนโลกจริงนั้นแม้ว่าจะสามารถระบุตำแหน่งการจับที่ดีบนวัตถุก็ตาม แต่มือหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปจับ ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ได้ อาจเป็นเพราะข้อจำกัดทางกายภาพของหุ่นยนต์ หรือสิ่งกีดขวางที่ขวางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ระนาบการการหยิบจับที่แสดงผลอยู่ในรูปของแผนภูมิความร้อนทรงกลมสามารถให้ทางเลือกที่ดีและดีน้อยกว่าในการวางแผนการเข้าจับทุกทิศทาง ผลลัพธ์ของระนาบการหยิบจับสามารถแสดงถึงเอกลักษณ์บางอย่างของวัตถุได้ ทำให้ทนทานต่อข้อมูลนำเข้าที่มีความคลาดเคลื่อนตั้งตัวอย่างการทดลองที่ได้แสดงในข้างต้น

5.2. แนวทางวิจัยในขั้นต่อไป

ถึงแม้ว่าผลลัพธ์จากการทดลองจะแสดงผลออกมาในแนวทางที่ดีแต่การทดลองยังคงอยู่บนจำนวนวัตถุทดลองที่ไม่มาก ดังนั้นเพื่อให้เห็นผลที่ดีควรต้องทำการทดลองบนวัตถุที่หลากหลายมากขึ้นเพื่อให้เห็นข้อดี หรือจุดด้อยของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอมากขึ้น รวมไปถึงขนาดของวัตถุทดลอง และความละเอียดของพื้นผิวที่อาจส่งผลต่อขั้นตอนวิธี ในบทที่ 4.2.2 ได้แสดงถึงขั้นตอนการนำเข้าวัตถุซึ่งได้จากการสแกนอย่างหยาบ ๆ ด้วย Kinect เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีการแต่ยังคงมีการนำข้อมูลที่ได้ไปปรับแต่งเบื้องหลังผ่านโปรแกรม MeshLab ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการหยิบจับวัตถุในโลกจริงมากขึ้นจึงต้องปรับปรุงกระบวนการนำเข้าวัตถุเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่าง real time

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เน้นไปที่การหาระนาบการหยิบจับแบบระนาบตัดผ่านจุดศูนย์กลางมวล ซึ่งมีข้อดีอย่างมากตรงที่ท่าจับสามารถทนทานต่อพลศาสตร์ของวัตถุ แต่ในบางกรณีนั้นอาจไม่เพียงพอต่อการหยิบจับบนโลกจริง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการการหาระนาบการหยิบจับพร้อมทั้งเสนอแนวทางการให้คะแนนระยะในการเข้าจับวัตถุในทิศทางของระนาบนั้น ๆ ด้วย แต่ไม่ได้ทำการทดลองวัดผลบนหุ่นยนต์จริง เนื่องด้วยข้อจำกัดของหุ่นยนต์ Katana ที่มีการเคลื่อนที่ ๆ ค่อนข้างจำกัด ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อวัดผลแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการวิธีที่ได้นำเสนอ

บรรณานุกรม

1. Howard, W.S. and V. Kumar, *On the stability of grasped objects*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996. **12**(6): p. 904-917.
2. Nguyen, V. *Constructing force-closure grasps*. in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1986.
3. Mishra, B., J.T. Schwartz, and M. Sharir, *On the existence and synthesis of multifinger positive grips*. Algorithmica, 1987. **2**(1-4): p. 541-558.
4. Eppner, C., et al., *Exploitation of environmental constraints in human and robotic grasping*. 2015. **34**(7): p. 1021-1038.
5. Murray, R.M., S.S. Sastry, and L. Zexiang, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. 1994: CRC Press, Inc. 480.
6. Sahbani, A., S. El-Khoury, and P. Bidaud, *An overview of 3D object grasp synthesis algorithms*. Robotics and Autonomous Systems, 2012. **60**(3): p. 326-336.
7. Shimoga, K.B., *Robot Grasp Synthesis Algorithms: A Survey*. Vol. 15. 1996. 230-266.
8. Roa, M.A. and R. Suarez, *Computation of Independent Contact Regions for Grasping 3-D Objects*. IEEE Transactions on Robotics, 2009. **25**(4): p. 839-850.
9. Ponce, J. and B. Faverjon, *On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995. **11**(6): p. 868-881.
10. Phoka, T., et al. *Planning optimal independent contact regions for two-fingered force-closure grasp of a polygon*. in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2008.
11. Stam, D., J. Ponce, and B. Faverjon. *A System For Planning And Executing Two-finger Force-Closure Grasps Of Curved 2D Objects*. in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1992.
12. Pipattanasomporn, P., P. Vongmasa, and A. Sudsang. *Caging rigid polytopes via finger dispersion control*. in *2008 IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation*. 2008.
13. Rodriguez, A., M.T. Mason, and S. Ferry, *From caging to grasping* %J *Int. J. Rob. Res.* 2012. **31**(7): p. 886-900.
 14. M. Bronstein, E., *Approximation of convex sets by polytopes*. Vol. 153. 2008. 727-762.
 15. Pereira, G.A.S., M.F.M. Campos, and V. Kumar, *Decentralized Algorithms for Multi-Robot Manipulation via Caging*. 2004. **23**(7-8): p. 783-795.
 16. Makapunyo, T., et al. *Measurement framework of partial cage quality*. in *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. 2012.
 17. Bonilla, M., et al. *Grasp planning with soft hands using Bounding Box object decomposition*. in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2015.
 18. Miller, A.T. and P.K. Allen, *Graspit! A versatile simulator for robotic grasping*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2004. **11**(4): p. 110-122.
 19. Diankov, R. and J. Kuffner, *OpenRAVE: A Planning Architecture for Autonomous Robotics*. 2011.
 20. Goldfeder, C., et al. *Grasp Planning via Decomposition Trees*. in *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2007.
 21. Ciocarlie, M.T. and P.K. Allen, *Hand Posture Subspaces for Dexterous Robotic Grasping*. 2009. **28**(7): p. 851-867.
 22. Diankov, R., *Automated construction of robotic manipulation programs*. 2010, Carnegie Mellon University. p. 239.
 23. Levine, S., et al., *Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection*. 2018. **37**(4-5): p. 421-436.
 24. Romero, J., H. Kjellstrom, and D. Kragic. *Modeling and evaluation of human-to-robot mapping of grasps*. in *2009 International Conference on Advanced Robotics*. 2009.
 25. Deimel, R. and O. Brock, *A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping*. 2016. **35**(1-3): p. 161-185.
 26. Amend, J.R., et al., *A Positive Pressure Universal Gripper Based on the Jamming of Granular Material*. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012. **28**(2): p. 341-350.

27. Ponce, J. and B. Faverjon. *On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects*. in *Fifth International Conference on Advanced Robotics 'Robots in Unstructured Environments*. 1991.
28. Canada, A. Inc. - *Intelligent Robots - Harmonic Arm*. [cited 2018 2018/09/15]; Available from: http://www.aai.ca/robots/h_arm.html.
29. Corsini, M., P. Cignoni, and R. Scopigno, *Efficient and Flexible Sampling with Blue Noise Properties of Triangular Meshes*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2012. **18**(6): p. 914-924.
30. Dabisias, G. *libfreenect2pclgrabber*. 2016 6 Oct 2016; Available from: <https://github.com/giacomodabisias/libfreenect2pclgrabber>.
31. Garrido-Jurado, S., et al., *Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion*. *Pattern Recognition*, 2014. **47**(6): p. 2280-2292.
32. Bradski, G., *The OpenCV Library*. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
33. Bernardini, F., et al., *The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction*. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999. **5**(4): p. 349-359.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กীরติ พูนวัฒน์ชัย
วัน เดือน ปี เกิด	4 พฤษภาคม 2535
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม คอมพิวเตอร์ จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557
ที่อยู่ปัจจุบัน	222/191 The parkland รัชดา-ท่าพระ แขวงดาวคะนอง เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600
รางวัลที่ได้รับ	ได้รับทุนอัจฉริยะคีนรั้งจากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 ถึง 2559